INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Abril 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ANTIGUO EGIPTO
La noción del tiempo

BIOLOGÍA
El interior del genoma

ACUICULTURA
Revolución azul en los océanos

FÍSICA
¿Qué veremos en el LHC?

Combatir la obesidad

Metabolismo, dieta y factores psicosociales

OBESIDAD | REVOLUCIÓN AZUL | FÍSICA EN EL LHC

N.º 415



ABRIL 2011

00415

9 770210 136004

6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Abril 2011, Número 415

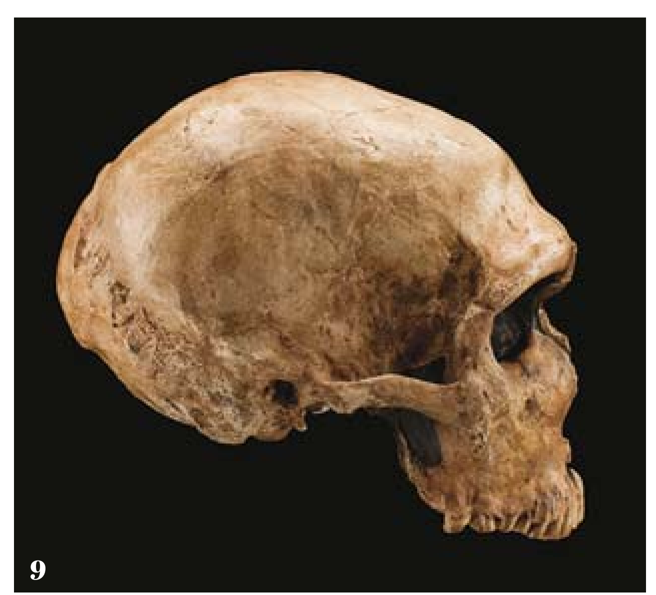
50

ARTÍCULOS

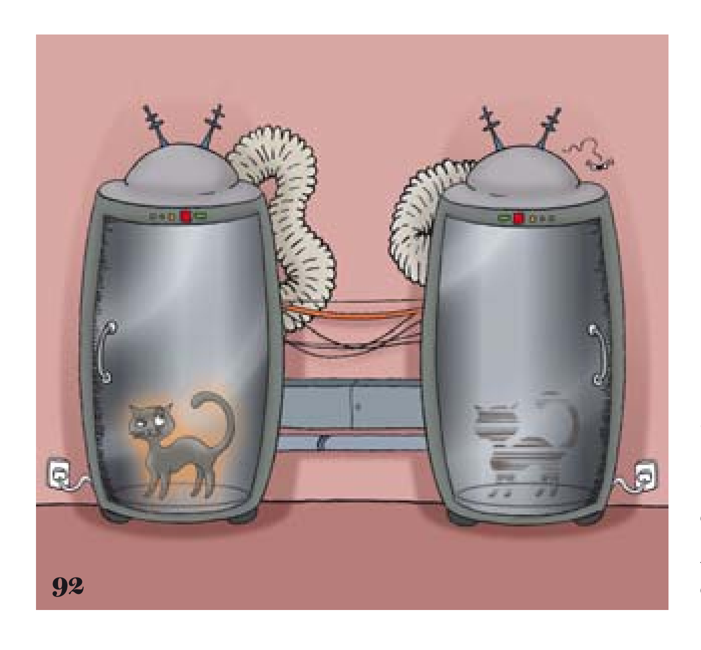
WIKIMEDIA COMMONS/AKKIDA



6



9



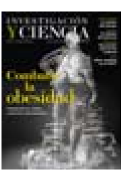
92

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

De seguir la tendencia actual, el exceso de peso superará al tabaquismo como causa principal de muerte evitable en EE.UU. Los expertos en salud a menudo pasan por alto la mejor estrategia a corto plazo para terminar con la epidemia de obesidad: los métodos de modificación de la conducta han cambiado los hábitos alimentarios y de ejercicio físico de muchas personas. Ilustración de Bryan Christie.



redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2011

Marzo 2011

CAMBIO CLIMÁTICO Y ESCEPTICISMO

«Escépticos frente a ortodoxos», de Michael D. Lemonick [Investigación y Cienica, enero de 2011], parece adolecer de un error bastante común. Al referirse a los escépticos del cambio climático, el autor tiende a evitar cualquier distinción entre escepticismo y negacionismo. Al mismo tiempo, enfatiza la rigidez de algunos de los pertenecientes a la corriente mayoritaria. Semejante panorama es injusto para los defensores honestos de ambas posturas. Calificar de «escépticos» a todos los que discrepan con la opinión generalizada equivale a llamar «crédulos» a la mayoría de los climatólogos.

El verdadero escepticismo (no el sesgo intratable que caracteriza al negacionismo) es de importancia fundamental para el método científico. Si existe una palabra para calificar la actitud de la climatología durante estos últimos años de hostilidad por parte de las políticas públicas, yo diría que es el escepticismo.

Con independencia de su postura frente a un asunto o su inclinación hacia una conclusión u otra, un escéptico siempre acabará allí donde le conduzcan las pruebas. Por el contrario, un negacionista solo interpretará los mismos indicios en la medida en que le sirvan para apoyar una conclusión ya tomada de antemano. En una época en la que abundan las informaciones erróneas y el analfabetismo científico, tanto científicos como periodistas deberían esforzarse en todo momento por distinguir entre ambas posturas.

Dom Stasi
Studio City, California

Responde Lemonick: *Quienes no aceptan el consenso científico general sobre el cambio climático abarcan un amplio espectro, desde aquellos que mantienen discrepancias legítimas sobre algunos detalles hasta quienes distorsionan los hechos, o quienes afirman que todo obedece a una conspiración socialista (o a una estafa para ganar dinero). Desde luego, es incorrecto meter a todos en un mismo saco. Aunque el propósito de mi artículo no consistía en distinguir entre las diferentes categorías, espero no haber provocado la impresión de que el escepticismo y el negacionismo constituyen actitudes equivalentes. Admito que el verdadero escepticismo es parte integrante de la metodología científica, pero creo haber insistido en que también lo practican quienes aceptan el consenso, no solo quienes lo rechazan.*

EVOLUCIÓN Y CÓPULA

En el artículo «Origen de la copulación» [Investigación y Ciencia, marzo de 2011], John A. Long sitúa el origen de la fecundación interna entre los vertebrados hace 375 millones de años. En los invertebrados, sin embargo, ya existían otras líneas evolutivas que habrían desarrollado mucho antes la cópula, la fecundación interna y el viviparismo. En algunos onicóforos, o gusanos aterciopelados, podemos encontrar estos tres fenómenos biológicos. Según algunas fuentes, estos gusanos habrían estado entre los primeros animales que se adaptaron al medio terrestre (donde solo es posible la fecundación interna) millones de años antes de que los placodermos habitaran los mares devónicos.

Por otro lado, me gustaría saber qué características se observaron en el microscopio electrónico de barrido para permitir la identificación del supuesto cordón umbilical fósil. ¿No podría haber sido otra cosa? ¿Por qué no?

Por último, según las investigaciones del autor, el origen de la copulación en los vertebrados coincide con la aparición de la mandíbula. Junto con la observación del comportamiento del tiburón coralero ñato, ¿es suficiente esta coincidencia para apoyar la hipótesis de que la mandíbula evolucionó para sujetar a la hembra durante la cópula? ¿Por qué? ¿Qué aspectos podría haber en contra de esta hipótesis?

Francisco J. del Rey Olegario
Alcalá de los Gazules, Cádiz

Responde Long: *Es cierto que la copulación es un fenómeno existente en un gran número de invertebrados. Sin embargo, como se menciona en el artículo, nuestros resultados solo se referían al caso más antiguo documentado de fecundación interna entre los vertebrados. En los invertebrados no existe ninguna prueba fósil sobre sus hábitos sexuales, por lo que solo pueden hacerse conjeturas sobre su comportamiento.*

Con respecto a la identificación del cordón umbilical, las imágenes del microscopio electrónico de barrido mostraron la existencia de vesículas, puntos de unión para ligamentos (appendiculae) *y un epitelio externo. Además, terminaba en una cavidad que bien pudo haber alojado un saco vitelino. Los detalles son complejos, pero el lector puede consultarlos en nuestra publicación original en el número de la revista* Nature *del 29 de mayo de 2008 [Long et al., vol. 453]. Ninguno de los revisores del artículo puso en duda que se tratase de una estructura umbilical (placentaria) fosilizada, ya que se sabe que los Placodermos de Gogo preservan otros tejidos blandos en estado fósil, como tejido muscular o nervioso (el lector puede consultar Trinajstic et al. en* Biology Letters *vol. 3, abril de 2007).*

Por último, las mandíbulas y las aletas pélvicas se dieron por primera vez entre los Placodermos, por lo que sabemos que aparecieron juntas. La hipótesis de que la mandíbula evolucionase para asistir durante el apareamiento constituye solo una propuesta especulativa. Por supuesto, no existe prueba alguna de ello.

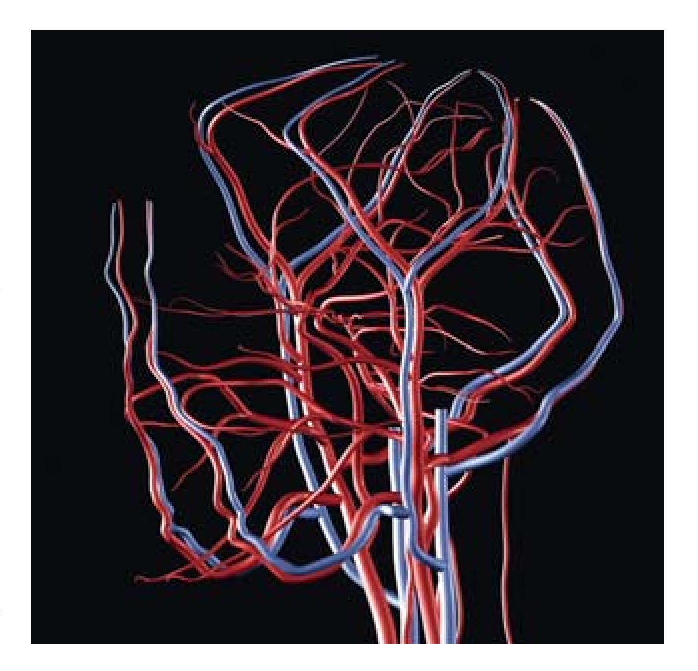
CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

NEUROLOGÍA

Atravesar la barrera hematoencefálica



La barrera hematoencefálica, una densa capa de células estrechamente unidas que recubren los capilares del cerebro como si de un regimiento de infantería se tratara, siempre ha constituido un obstáculo para la neurología. Si bien es cierto que esta línea de defensa protege al cerebro de cualquier sustancia potencialmente dañina, también impide el paso de la mayoría de los medicamentos. Desde hace decenios se ha intentado suprimir la barrera durante el tiempo suficiente para que los fármacos contra el alzhéimer, el párkinson o los tumores la atraviesen. Ahora, los investigadores afirman haber realizado algún avance.

El nuevo método utiliza microburbujas, pequeñas burbujas formadas a partir de un gas rodeado por una rígida celda de lípidos. Diversos científicos de Harvard, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, Columbia y otras instituciones están desarrollando formas de inyectar las burbujas en el torrente sanguíneo y guiarlas mediante ultrasonidos hacia la barrera hematoencefálica. Después, las burbujas abren la barrera en puntos específicos indicados por el rayo de ultrasonidos. Una vez rota la barrera, se inyectan en el paciente nanopartículas recubiertas por medicamento y dotadas de carga magnética; se utilizan luego rayos de resonancia magnética para guiarlas hacia el lugar necesario. Hasta el momento, los estudios en roedores han demostrado que el empleo de ultrasonidos y microburbujas aumenta hasta el 20 por ciento la cantidad de medicamento antitumoral o contra el alzhéimer que alcanza el cerebro.

Las microburbujas constituyen solo la última y más prometedora de las ideas recientes que buscan resolver el problema de la barrera hematoencefálica. Otros proyectos contemplan la inserción de un catéter en los capilares del cerebro y el diseño de una serie de medicamentos que «engañen» al cerebro para poder acceder a él.

Parece que las microburbujas resultan menos invasivas y más eficientes que otras soluciones. Sin embargo, todavía deben superarse algunas dificultades. La principal consiste en aumentar la intensidad de los ultrasonidos para que la técnica funcione en humanos sin provocar daños en sus tejidos.

—Jeneen Interlandi

BIOESTADÍSTICA

Obesidad animal

Cuando engordamos, solemos echar las culpas a la dieta y a la falta de ejercicio. Sin embargo, los monos tities y los macacos de un laboratorio de Madison han venido engordando desde 1982, a pesar de haber seguido la misma dieta y la misma actividad física desde entonces. David B. Allison, bioestadístico de la Universidad de Alabama en Birmingham, opina que la causa podría deberse a factores ambientales. Junto a otros colaboradores, estudió los cambios de peso de unos 20.000 animales, desde primates y cobayas empleados en investigación hasta perros y gatos domésticos o ratas urbanas. Registraron el cambio de peso que los animales habían experimentado en una década, así como su probabilidad de padecer obesidad. Ambas cifras mostraron una fuerte tendencia al alza. Los chimpancés engordaron un 33,6 por ciento en diez años; los ratones, un 12,46 por ciento.

Como causa, Allison apunta a determinados factores, como algunas toxinas presentes en el agua potable y que afectan al sistema endocrino o ciertos patógenos que alteran el metabolismo de los mamíferos. Otros afirman que los datos podrían obedecer a cambios en la dieta y en el ejercicio, quizá provocados por un aumento en el número de animales de laboratorio que se guardan en la misma jaula. Allison concede que las condiciones de vida podrían influir en el metabolismo, pero insiste en que también los humanos viven cada vez más aglomerados. Es justo la clase de novedad que atribuye a sus resultados. «Si la densidad de individuos en una jaula afecta al peso de los animales, quizá la densidad de viviendas también afecte al peso corporal de las personas», afirma.

—Alla Katsnelson
Nature

LONDON_ENGLAND/FOTOLIA (*arterias y venas del cerebro*); LORI ADAMSKI PEEK/GETTY IMAGES (*gato*)

BIOLOGÍA

Estación de nacimiento y salud mental

Varios estudios recientes indican que los bebés nacidos en invierno tienen más probabilidades que los nacidos en verano de desarrollar enfermedades como la esquizofrenia, la depresión o el trastorno afectivo estacional. Uno de los estudios ayudaría a explicar la causa de esta diferencia: la cantidad de luz diurna a la que se exponen los ratones recién nacidos determina el funcionamiento, a lo largo de la vida, de algunos genes clave relacionados con el reloj biológico.

Un grupo de investigadores de la Universidad Vanderbilt y de la Universidad de Alabama en Birmingham crió a dos grupos de ratones: en uno de ellos simuló las condiciones de invierno, con ocho horas de luz solar al día, y en el otro las de verano, con dieciséis horas de luz solar al día. Después, durante otras cuatro semanas, se sometió a los grupos bien a la misma pauta o bien a la opuesta. En comparación con los ratones «de verano», los genes del reloj biológico de los ratones «de invierno» se activaban durante períodos más cortos, sin importar la longitud de los días después del destete de los animales. Los ratones de invierno también se mostraban más activos por la noche, de forma similar a lo que sucede en los pacientes con trastorno afectivo estacional, lo que indicaba que sus relojes biológicos no se ajustaban a la hora del día en que se hallaban. Pero no hay que precipitarse a comprar una lámpara de rayos UV para la habitación del bebé: los investigadores aún no han determinado los efectos de las señales estacionales en los humanos.

—Melinda Wenner Moyer



ARQUEOLOGÍA

Aparenta 11 años, pero tiene 2500

El ADN de una tumba hallada en Atenas a mediados de la década de los noventa ayudó a identificar a la fiebre tifoidea como una posible causa de la plaga que, en el siglo v a.C., acabó con un cuarto de la población de la ciudad. Manolis Papagrigorakis, el ortodoncista de la Universidad de Atenas que publicó el descubrimiento en 2006, ha ayudado ahora a restaurar el cráneo de una niña de once años encontrado en la misma tumba. El rostro de la pequeña, conocida como Myrtis, formó parte de la exposición *Myrtis: cara a cara con el pasado*, celebrada en el Museo Arqueológico de Tesalónica. Su reconstrucción es la primera de un habitante común de la Grecia antigua. Los detalles se publicaron en el número de enero de la revista *Angle Orthodontist*.

Papagrigorakis trabajó con Oscar Nilsson, experto en reconstrucciones faciales, quien aplicó una técnica utilizada a menudo en la investigación forense y en la que se procede de músculo a músculo. El cráneo constituyó el andamiaje para muchos de los rasgos de la niña; sus dientes guiaron la forma de los labios. A Richard Neave, que reconstruyó a Filipo II, padre de Alejandro Magno, suelen preguntarle qué aspecto tenía la gente de la antigüedad. Según Neave, Myrtis muestra al mundo que la gente no ha cambiado.

—Alison McCook

AARON MCCOY/GETTY IMAGES (*bebé*); YIORGOS KARAHALIS/REUTERS (*Myrtis*); PARC CIENTÍFIC DE BARCELONA/RAIMON SOLÉ (*feria de investigación*)

AGENDA

CONFERENCIAS

8 de abril – Jornada
Matemáticas y Química
Universidad de Sevilla
Sevilla
www.imus.us.es/ACT/RSME-RSEQ-2011

14 de abril – Seminario
Formación estelar
Mayra Osorio (IAA-CSIC)
Instituto de Astrofísica de Andalucía
Granada
www.iaa.es/seminarios

14 de abril
Reconocimiento molecular con receptores biológicos
François Diederich, Instituto Politécnico Federal Suizo en Zúrich
Fundación BBVA
Bilbao
www.cicbiogune.es/qys

EXPOSICIONES

Dinosaurios. Tesoros del desierto de Gobi
Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

Hasta el 30 de abril
Biodiversidad española
Fotografías de Antonio Atienza
Foro de la Biodiversidad
Sevilla
www.biodiversidadespañola.com

El asombro de Mr. Darwin
Casa de las Ciencias
La Coruña
www.misterdarwin.eu

OTROS

Del 5 al 7 de abril – Feria
Investigación en directo
Organiza: Parque Científico de Barcelona
La Pedrera
Barcelona
www.pcb.ub.edu/homePCB/live/ct/p1826.asp



GENÉTICA

Diversidad olfativa y evolución

Se sabe desde hace tiempo que los humanos percibimos los olores de manera diferente. Ahora, varios estudios a gran escala han demostrado que tal diversidad es aún mayor de lo que se pensaba: las personas percibiríamos de un modo distinto la mayoría de los olores, si no la totalidad de ellos. Además, para muchos de nosotros existe al menos un aroma imposible de detectar. «El mundo olfativo de cada persona es un mundo único y privado», afirma Andreas Keller, genetista de la Universidad Rockefeller.

Durante el proceso evolutivo —y en parte debido a que los humanos fueron apoyándose cada vez más en la visión en detrimento del olfato— los genes que codifican nuestros aproximadamente 400 receptores olfativos comenzaron a acumular mutaciones. Doron Lancet, genetista del Instituto Científico Weizmann de Rehovot, en Israel, apunta que una vez que un gen ha acumulado un número determinado de mutaciones se convierte en «pseudogén»: deja de codificar receptores operativos. Personas diferentes poseen combinaciones distintas de pseudogenes. «Al final es como si cada individuo portase un código de barras ligeramente distinto al de los demás», afirma Lancet.

Esas modificaciones genéticas parecen originar variaciones en el comportamiento. Cuando Keller y sus colaboradores pidieron a 500 personas que clasificasen 66 olores según su intensidad y agrado, las respuestas abarcaron todas las posibles valoraciones: desde débil hasta intenso y desde agradable hasta desagradable. En un estudio en la Universidad de Dresde, Thomas Hummel y sus colaboradores hicieron pruebas a 1500 jóvenes con 20 aromas diferentes. Hallaron insensibilidades específicas a todos los olores menos uno: la citralva, con olor a cítrico. Keller concluye que quizá todo el mundo tenga su propio «punto ciego» olfativo.

—Laura Spinney



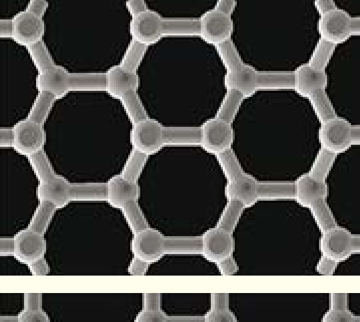
MATERIALES

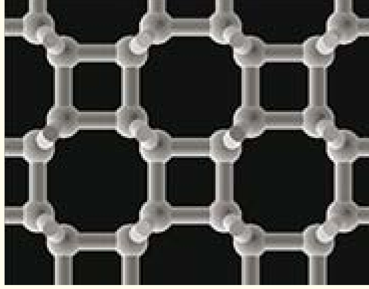
Nuevas formas del carbono

El carbono puro puede adoptar las formas más diversas: el diamante, los nanotubos de carbono o el grafeno, por ejemplo, poseen unas características fisicoquímicas únicas. Por si fuera poco, cada vez hay más indicios que apuntan a la existencia de otra estructura cristalina que añadir al catálogo de maravillas del carbono.

La nueva variedad fue observada por vez primera en 2003. Ese año, un grupo de investigadores aplicó sobre una muestra de grafito una presión elevada a temperatura ambiente. Al sufrir la compresión, el grafito, que se compone de capas de átomos de carbono apiladas unas sobre otras, comenzó a asumir una forma desconocida: un híbrido entre la configuración del grafeno y la del diamante. Sin embargo, la naturaleza exacta de esta nueva forma del carbono aún se desconoce.

Dos simulaciones por ordenador recientes sugirieron que el grafito comprimido en frío quizá contuviese cristales de una estructura denominada tetragonal centrada en el cuerpo (bct, por sus siglas en inglés), además de otro tipo llamado carbono-M. En la estructura bct, grupos de cuatro átomos se disponen en cuadrados, los cuales se apilan de tal manera que cada uno de ellos forma enlaces químicos con cuatro cuadrados de la capa superior y otros cuatro de la capa inferior. Un equipo de investigadores dirigido por Hui-Tian Wang, de la Universidad Nankai de Tianjin, en China, mostró que, durante la compresión en frío, la transición al carbono bct libera energía. Ello apunta a que dicha transición podría ocurrir en el mundo real.





En otra simulación de un equipo japonés y norteamericano, el carbono bct producía patrones de difracción de rayos X similares a los que se vieron en el año 2003. Wendy L. Mao, de la Universidad de Stanford y participante del descubrimiento de 2003, afirma que la correspondencia entre la simulación y el experimento era bastante buena. Pero, a pesar de todos estos indicios, determinar si el carbono bct existe o y si puede ser sintetizado en estado puro es aún una tarea pendiente para los físicos experimentales.

—Davide Castelvecchi

STEVE LEWIS/GETTY IMAGES (*narices*); DE «AB INITIO STUDY OF THE FORMATION OF TRANSPARENT CARBON UNDER PRESSURE», POR XIANG-FENG ZHOU ET AL., EN *PHYSICAL REVIEW B*, VOL. 82, N.º 13; 29 DE OCTUBRE DE 2010 (*bct*)

NEUROCIENCIA

Mientras dormimos

Los beneficios del sueño resultan obvios para todos. Aun así, los expertos llevan años debatiendo acerca de qué procesos neuronales mejoran el rendimiento del cerebro durante el sueño. Hay quien defiende que, al dormir, se reducen las conexiones sin importancia entre neuronas y se evita así una sobrecarga del cerebro. Otros, por el contrario, afirman que el sueño consolida los recuerdos del día anterior.

Hace unos meses, un grupo de investigadores decidió estudiar el caso del pez cebra, un pez translúcido común en muchos acuarios domésticos. Al igual que los humanos, el pez cebra permanece activo durante el día y duerme por la noche. A diferencia de nosotros, sus larvas son transparentes, lo que permite monitorizar su cerebro mientras duerme. Lior Appelbaum y Philippe Mourrain, de la Universidad de Stanford, y sus colaboradores marcaron las neuronas de las larvas con un tinte que coloreaba de verde las células activas y de negro las pasivas. Una actividad neuronal reducida mostraría que se suprimían conexiones superfluas, mientras que un proceso de consolidación de recuerdos dejaría un patrón diferente.

Sinapsis en un pez cebra

El equipo halló que la actividad neuronal del pez cebra disminuía durante el sueño. Los resultados, publicados en *Neuron*, muestran por primera vez los efectos que los ciclos de sueño y el momento del día ejercen sobre las sinapsis de un vertebrado vivo. Según Mourrain: «El sueño es un proceso activo que reduce la actividad en el cerebro y permite que este se recupere de sus experiencias pasadas». Sin esa disminución de las sinapsis, el cerebro no podría continuar recibiendo y almacenando nueva información.

El debate no está cerrado, sin embargo. Los investigadores hallaron también que no todos los circuitos neuronales se veían afectados de la misma forma: Mourrain indica que el aprendizaje y la memoria podrían resultar los más beneficiados. Según Jan Born, neurocientífico de la Universidad de Lübeck, puede que ambas hipótesis no sean mutuamente excluyentes. Quizá la solución no se encuentre muy lejos. En los próximos años, la técnica ideada por Mourrain y Applebaum permitirá realizar estudios más detallados del cerebro durante el sueño.

—Carrie Arnold

BIOLOGÍA MOLECULAR

Una nueva herramienta para la mejora vegetal



Estructura tridimensional de una proteína del maíz restauradora de la fertilidad.

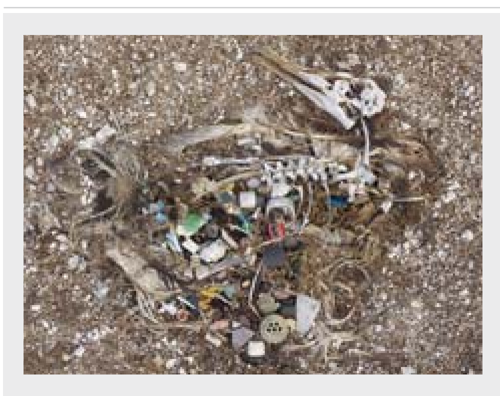
Las plantas que sufren esterilidad masculina citoplasmática, una alteración de la producción de polen debida a genes extranucleares de herencia materna, son infértiles. Sin embargo, existen genes nucleares «restauradores de la fertilidad» (RF) que tienen la capacidad de suprimir dicha esterilidad y regenerar la producción de polen viable.

Fruto de la colaboración entre la Universidad de Purdue, la Estación Experimental del Zaidín (CSIC) en Granada y la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, se ha desarrollado una nueva herramienta molecular que facilita el estudio de dichos genes restauradores. El trabajo se publicó en diciembre de 2010 en la revista *PloS ONE*. Consiste en un sistema de nomenclatura unificada que clasifica las proteínas de la familia de RF con independencia del germoplasma o especie vegetal de que provengan. El método de clasificación se basa en el genoma de la planta y la caracterización estructural y funcional de las proteínas RF mediante modelización molecular y reconstrucción tridimensional.

Hasta la fecha, los genes de la familia RF se habían clasificado conforme se iban descubriendo y secuenciando, pero sin seguir un criterio unificado ni tener en cuenta su funcionalidad biológica. Ello dificultaba su manejo en el contexto de la genómica funcional comparativa. La nueva herramienta molecular permitirá un progreso más rápido y un mayor desarrollo de la mejora genética de plantas, puesto que facilitará la comprensión del mecanismo y sustrato biológico de la restauración de la fertilidad vegetal.

—José Carlos Jiménez López

¿QUÉ ES ESTO?



Muerte por plástico: Una buena parte de los 260 millones de toneladas de plástico que se usan cada año en el mundo va a parar a los océanos, con el consiguiente peligro para la vida marina. En el Pacífico norte se ha observado una enorme masa de basura flotante, la cual ha sido bautizada como Gran Mancha de Basura del Pacífico. A lo largo de los dos últimos años, el fotógrafo Chris Jordan ha documentado el efecto de los residuos plásticos sobre la fauna y flora del atolón de Midway, al noroeste de las islas Hawai. En esta zona, de unos ocho kilómetros cuadrados, habitan albatros. A menudo, los especímenes adultos confunden residuos de colores con animales marinos y alimentan con ellos a sus crías, con letales consecuencias. «Hay un ave muerta cada diez pasos, en diferentes estados de descomposición», afirma Jordan, que fotografió a los polluelos y los contenidos de sus estómagos: tapones de botellas, encendedores y tapas de botes de especias, entre otros.

—Ann Chin

CORTESÍA DE GORDON WANG Y PHILIPPE MOURRAIN *Universidad de Stanford (sinapsis)*; J. C. JIMÉNEZ LÓPEZ *(proteína)*; CHRIS JORDAN *(pájaro)*

MEDICINA

Grasa parda y obesidad

La activación del tejido adiposo marrón podría ayudar a compensar el desequilibrio metabólico que conduce a la acumulación de peso

La obesidad se ha convertido en una epidemia del siglo xxi, con un aumento masivo de su incidencia en las poblaciones de países desarrollados o en vías de desarrollo, y con graves consecuencias para la salud [*véase* «Combatir la obesidad», por David H. Freedman, en este mismo número].

La acumulación de peso se debe a un desequilibrio entre la entrada al organismo de calorías (a través de la comida) y el gasto de las mismas. Este desequilibrio que conduce a la obesidad no solo puede deberse a un exceso en la entrada de energía química (sobrealimentación) sino también a un gasto defectuoso de energía metabólica. Investigaciones recientes han demostrado que la actividad de la grasa parda, el tejido que quema calorías para producir calor, podría constituir un factor clave en alteraciones de este segundo proceso determinante de la obesidad, el gasto energético.

La grasa blanca, o normal, se encarga de almacenar grasas. La grasa parda, o tejido adiposo marrón, en cambio, desempeña la función opuesta: quema grasas y carbohidratos para producir calor. Esta función termogénica es importante en el mantenimiento de la temperatura corporal de los mamíferos en ambientes fríos. Los primeros indicios de la implicación de la grasa parda en la obesidad de descubrieron a finales de los años sesenta a partir de los trabajos de M. Stock y N. Rothwell, entonces en la Universidad de Cambridge. Se observó que, cuando se alimentaba a ratones con una dieta hipercalórica —semejante a la comida «basura» que consumen algunos humanos—, aumentaba de forma notable la cantidad de calorías ingeridas por los animales. No obstante, el grado de aumento de peso no se correspondía con el incremento de las calorías ingeridas. Parecía como si una cierta cantidad de calorías desapareciese. Se hallaban ante un fenómeno de «termogénesis inducida por la dieta».

Hallaron que la grasa parda se hipertrofiaba y sobreactivaba en esos múridos, de manera similar a lo que ocurría en los animales expuestos a un ambiente frío. La capacidad de la grasa parda de disipar la energía metabólica en forma de calor aparecía como un mecanismo de defensa frente a la sobrealimentación, con capacidad de disminuir la acumulación de energía química y, por tanto, de paliar el aumento del peso corporal. Estudios posteriores en animales relacionaron la obesidad de origen genético con una activación defectuosa de la grasa parda.

La capacidad de la grasa parda para generar calor se debe a la existencia de una proteína única en las mitocondrias de las células adiposas de este tejido: la proteína desacoplante UCP1. Esta molécula, ausente en las mitocondrias de los otros tejidos, tiene la capacidad de permeabilizar la membrana mitocondrial a los protones. De esta forma, la oxidación de metabolitos en la respiración mitocondrial y el bombeo de protones que ello genera no se invierten en la generación de ATP, como en las mitocondrias normales, sino que se disipa en forma de calor.

Tradicionalmente, a tenor de los estudios anatómicos e histológicos clásicos, se pensaba que la grasa parda en humanos se hallaba presente en cantidades significativas solo en la etapa neonatal, sobre todo en las zonas perirrenal y dorsal. Se consideraba que la grasa parda involuciona con la edad y que el humano adulto prácticamente carece de ella, a diferencia de los roedores. ¿Significa eso lo que las observaciones en animales sobre la función clave de la grasa parda en el control de la obesidad podían ser irrelevantes en los humanos adultos? Durante años se ha mantenido esta controversia, aunque la mayoría de los investigadores tendían al escepticismo sobre la función de la grasa parda en los humanos adultos.



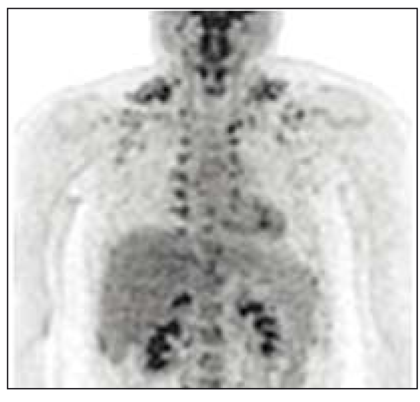


Imagen por tomografía de emisión de positrones de grasa parda activa en un paciente delgado (*izquierda*) y poco activa en un paciente obeso (*derecha*). Las áreas principales de actividad de la grasa parda (*zonas oscuras*) se observan en el cuello, zona supraclavicular y alrededor de las vértebras.

CORTESÍA DE W. D. VAN MARKEN LICHTENBELT

También en adultos

No obstante, esa visión ha dado un vuelco espectacular en los último años y, como sucede a menudo en ciencia, merced a los trabajos realizados en otro campo de investigación: las nuevas técnicas de imagen para el diagnóstico oncológico. Dentro de estas técnicas, destaca la tomografía de emisión de positrones (TEP). Se basa en utilizar derivados de la glucosa con isótopos que emiten positrones para el rastreo de zonas que consumen niveles elevados de glucosa. Algunos órganos, como el cerebro o el corazón, utilizan muy ávidamente la glucosa de forma natural; en cambio, en otras áreas de menor actividad metabólica, un consumo elevado de glucosa puede ser indicativo de un tumor.

Sucedió que los oncólogos observaban a menudo zonas de alta actividad metabólica, sobre todo en la zona supratorácica, que no correspondían a ningún tumor y que llegaban incluso a enmascarar la posibilidad de discernir en esas zonas puntos tumorales de alta actividad. Resultó ser la presencia de grasa parda activa lo que estaba generando esas «molestas» imágenes de TEP para el diagnóstico oncológico, señales anómalas que disminuían su intensidad si se mantenía al paciente en un ambiente cálido. Los estudios subsiguientes, en inicio casuales, han

dado lugar a una revolución en la consideración de la presencia de grasa parda activa, regulable por estímulos termogénicos, en humanos adultos. Existen ya datos que correlacionan de forma inversa la intensidad de estas señales TEP indicativas de grasa parda activa y la obesidad.

La constatación de la presencia de grasa parda activa en humanos, además de proporcionar una posible explicación de la tendencia a la obesidad en algunos individuos (que tendrían alterada la capacidad de gasto energético por una actividad defectuosa de la grasa parda), permite contemplar este tejido como una potencial diana terapéutica. En este sentido, el reciente hallazgo de que la hormona FGF21, con acción antiobesidad y antidiabética en animales, promueve la actividad de la grasa parda, abre una nueva vía de investigación. El desarrollo de fármacos o estrategias nutricionales dirigidos a activar la grasa parda podrían contribuir a combatir la epidemia de obesidad.

—Francesc Villarroya, Roser Iglesias y Marta Giralt
Universidad de Barcelona
Centro de Investigación Biomédica en Red Fisiopatología de la Obesidad y Nutrición (CIBERobn)

ECOLOGÍA

Islas de recursos

Cómo retener nitrógeno en suelo del desierto

A pesar de que el nitrógeno (N) es el elemento más abundante en la atmósfera, la única manera en que los seres vivos pueden disponer de N atmosférico es a través de bacterias que medran en el suelo o en las raíces de algunas plantas. El nitrógeno así fijado puede ser devuelto a la atmósfera por otras bacterias, o bien permanecer formando parte del suelo y de la biomasa de los ecosistemas terrestres (eventualmente puede llegar al mar a través de compuestos solubles). En el proceso de fijación biológica, el N atmosférico es reducido a amoniaco (NH_3) para luego ser convertido en el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) que usan los seres vivos.

En ecosistemas con lluvias estacionales, la fijación y circulación del nitrógeno se ve dificultada en los períodos de escasez de agua; en la época de lluvias, la retención del nitrógeno en el suelo se ve amenazada por la pérdida de formas solubles (sobre todo nitrato), la escorrentía y la lixiviación.

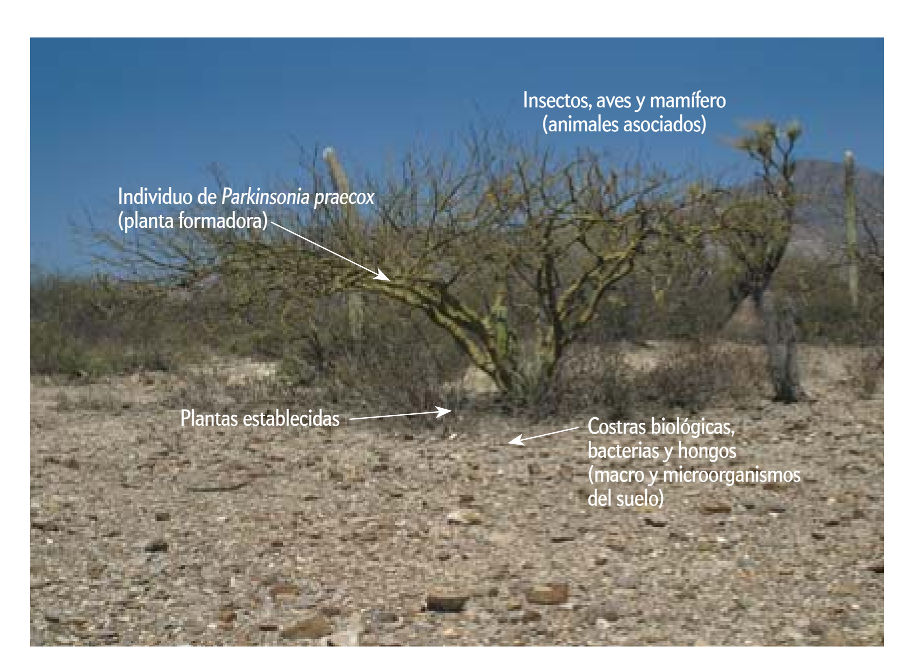
La productividad primaria de ecosistemas áridos y semiáridos depende sobremanera de la disponibilidad de nitrógeno. Sin embargo, el procesamiento del N en estos ecosistemas es lento, pues se halla restringido a los períodos con disponibilidad de agua. Además, las cantidades procesadas de N son menores que en otros ecosistemas. El reservorio de nitrógeno en el suelo incluye el N disuelto y el N contenido en la biomasa microbiana y en las raíces que van muriendo. En los desiertos, la proporción de biomasa subterránea es similar a la de biomasa aérea; la eliminación de biomasa vegetal aérea implica la muerte de una cantidad notable de biomasa subterránea, indispensable para los mecanismos de conservación del N en el ecosistema.

Una característica sobresaliente de los desiertos es que la vegetación se presenta en parches de variadas formas y tamaños, separados por áreas sin cubierta vegetal. Estos parches de vegetación se consideran islas de recursos.

Una isla de recursos está integrada por cuatro elementos: la planta formadora (uno o varios individuos de la misma especie con capacidad de inducir modificaciones biogeoquímicas importantes al suelo, como la fijación de nitrógeno); las plantas establecidas bajo la copa de la planta formadora; los macro y microorganismos del suelo (costras biológicas, bacterias y hongos asociados a las raíces, bacterias, bacterias y hongos de vida libre o ambos) y, por fin, los animales asociados a las plantas de la isla.

En cuanto a las funciones ecológicas, las islas de recursos facilitan la concentración y el enriquecimiento de nutrientes y agua, el secuestro o la retención de elementos como el carbono (C) y el nitrógeno, y el procesamiento y la transformación de C y N.

En numerosas plantas de desierto, el sistema radicular ocupa un área mayor



En el desierto se forman a menudo parches de vegetación. Por su notable función ecológica, se consideran islas de recursos. En la fotografía se muestran los cuatro componentes básicos de una isla de recursos en un matorral semiárido del valle de Tehuacán (región central de México). El suelo bajo la copa contiene una concentración elevada de nitrógeno y materia orgánica.

que el área de la copa, por lo que los nutrientes capturados por las raíces se concentran en el área cubierta por la copa (desde la cual son reincorporados al suelo por la caída de hojas, ramas, flores, etcétera). La disponibilidad de agua en el suelo es varias veces mayor bajo la copa que en el área circundante desprovista de vegetación.

Además de concentrar la disponibilidad de agua y nutrientes, las islas de recursos pueden considerarse unidades de procesamiento y transformación de materiales del ecosistema.

Retención de nitrógeno

Estudios de zonas áridas y semiáridas de España, México y Argentina indican que para comprender el enriquecimiento de nitrógeno del suelo de islas de recursos es necesario explorar mecanismos no solo de adquisición sino también de retención de nitrógeno. Se ha demostrado en desiertos norteamericanos que el N fijado en las costras biológicas superficiales nunca se incorporan al suelo sino que se pierde casi en su totalidad (regresa a la atmósfera).

En una investigación reciente, realizada en un ecosistema tropical semidesértico del centro de México, demostramos que el procesamiento conjunto de N y C en el suelo constituye un mecanismo importante de retención de nitrógeno en islas de recursos. Pensamos que la energía generada durante el procesamiento del C por la microbiota heterótrofa es la que permite, a su vez, el procesamiento del N y el enriquecimiento de su reservorio en el suelo. Los resultados del estudio se publicaron en febrero de 2010 en *Functional Ecology*.

Debido a diferencias en la calidad de la hojarasca, los exudados radiculares y otros restos vegetales que producen distintas especies de plantas formadoras de islas de recursos, la cantidad de N retenido en el suelo varía de una especie a otra. Esas diferencias interespecíficas en el procesamiento de N podrían tener implicaciones ecológicas y evolutivas. En términos ecológicos, diferencias en los reservorios de N generados pueden traducirse en diferencias en la identidad y la cantidad de especies asociadas a cada isla de recursos. En términos evolutivos, diferentes genotipos de especies formadoras de islas pueden presentar capacidades distintas de procesar el nitrógeno a partir de interacciones C-N. En otras palabras, diferentes capacidades para la producción (en cantidad y en calidad) de hojarasca, raíces muertas y exudados podrían favorecer diferencias en el éxito reproductivo (y, por tanto, en la adecuación y en las posibilidades de ser favorecidas por la selección natural) entre especies formadoras de islas de recursos.

Un hallazgo de mayor importancia ha sido la comprobación de que la mayor parte del nitrógeno se conserva en la biomasa microbiana porque las formas solubles son difícilmente retenidas en estos suelos. Ello deberá, por tanto, tenerse en cuenta en los programas de manejo y conservación de ecosistemas desérticos, puesto que el sobrepastoreo y la extracción excesiva de leña, además de exponer los suelos a mayores intensidades de erosión y reducir la producción primaria potencial de la vegetación remanente, disminuyen la fijación y la retención de nitrógeno.

—Yareni Perroni
Instituto de Investigaciones Forestales
Xalapa, Veracruz, México
—Carlos Montaña
Departamento de biología evolutiva
Instituto de Ecología
Xalapa, Veracruz, México

ASTROFÍSICA

La edad de las enanas blancas

El estudio de las transiciones de fase durante el proceso de enfriamiento permite calcular con precisión la edad de estas estrellas

Las enanas blancas constituyen el último estadio de la evolución de la mayoría de las estrellas. Toda estrella con una masa inferior a unas 10 veces la masa del Sol (el 95 por ciento de la población estelar del universo) acaba sus días convirtiéndose en una enana blanca. Por ello, las enanas blancas se encuentran entre las estrellas más abundantes del universo.

Cuando una estrella como el Sol o similar agota su combustible nuclear, expulsa al espacio sus capas más externas y deja un residuo muy compacto. El interior de este remanente se compone principalmente de carbono y oxígeno (los productos de las reacciones nucleares de fusión que tuvieron lugar durante las etapas previas en la vida de la estrella) junto a trazas de otros elementos químicos, como los isótopos ^{22}Ne (neón), ^{25}Mg (magnesio) y ^{54}Fe (hierro). Las enanas blancas tienen una masa similar a la del Sol, pero un tamaño equiparable al de la Tierra. Su densidad alcanza valores formidables, del orden de una tonelada por centímetro cúbico.

A semejantes densidades los efectos cuánticos de la materia cobran importancia. A diferencia de las estrellas de tipo solar, que resisten al colapso gravitatorio gracias a la energía que libera la fusión del hidrógeno en su interior, las enanas blancas carecen de combustible nuclear. Son estables gracias al principio de exclusión de Pauli, que determina que en un mismo nivel energético no puede haber más de dos electrones. Ello implica que la mayoría de los electrones de una enana blanca, al hallarse tan próximos entre sí, ocupan niveles de energía muy altos. Eso quiere decir que se mueven a grandes velocidades o, en otras palabras, que el gas de electrones existente en el interior de una enana blanca se encuentra a presiones muy elevadas. Esa presión se opone al colapso de la estrella y la mantiene estable.

Evolución

En el momento de su formación, las enanas blancas son brillantes (cientos de miles de veces más que el Sol) y presentan un color entre blanco y azul, lo que les da su nombre. Con el paso del tiempo, sin embargo, se van enfriando poco a poco. Ese proceso de enfriamiento ha concitado un enorme interés durante los últimos decenios. Ello se debe a que, en astrofísica, las enanas blancas se emplean a modo de cronómetro.

Al igual que ocurre con cualquier otro sistema físico, cuanto menor es la temperatura de una enana blanca, más tiempo necesita para enfriarse aún más. A medida que disminuye la temperatura, el color de la estrella cambia de manera gradual (se torna cada vez más rojiza) y su brillo decrece. Por tanto, si descubrimos la enana blanca más débil de un sistema estelar (nuestra galaxia, pongamos por caso) y disponemos de modelos teóricos fiables para calcular su edad a partir de su brillo, sabremos con muy buena aproximación la edad del sistema estelar en cuestión.



VOLKER WENDEL, JOSEF PÖPSEL Y STEFAN BINNEWIES

El cúmulo estelar abierto NGC 6791, en la constelación de Lyra, se halla muy próximo a nosotros (a unos 13.000 años luz), por lo que ha sido estudiado con gran detalle. Hasta hace poco, no se entendía por qué la edad calculada a partir de las estrellas de la secuencia principal (unos 8000 millones de años) era distinta de la estimada a partir de sus enanas blancas (6000 millones de años).

En 1987 un equipo de investigadores estadounidenses liderado por D. Winget, de la Universidad de Texas en Austin, hizo una búsqueda sistemática de las enanas blancas menos brillantes de la galaxia. Hallaron que el número de enanas blancas por unidad de volumen aumentaba para los brillos intrínsecos más débiles. Este resultado es fácil de entender: la probabilidad de encontrar una enana blanca con un brillo determinado es proporcional al tiempo durante el que la enana blanca se mantiene con dicho brillo. Las enanas blancas más brillantes se enfrían con rapidez, pero las más débiles lo hacen lentamente, por lo que las enanas blancas más débiles abundan más que las brillantes.

Sin embargo, las investigaciones pusieron de manifiesto que, para brillos inferiores a una diezmilésima del brillo del Sol, el número de enanas blancas por unidad de volumen caía abruptamente. Ese déficit se atribuyó a la edad finita del disco de la galaxia: las enanas blancas de la Vía Láctea no habrían tenido tiempo de enfriarse más allá de una diezmilésima del brillo solar. Por tanto, si se lograba calcular con precisión el tiempo de enfriamiento, sería posible deducir la edad de nuestra galaxia. Los cálculos preliminares estimaron su edad en unos 10.000 millones de años.

Transiciones de fase

Cuando un gas se enfría experimenta dos transiciones de fase: primero se transforma en líquido y, a temperaturas aún menores, cristaliza. Estos cambios de estado van siempre acompañados de la liberación de una cierta cantidad de energía, denominada calor latente. En el caso de una enana blanca, esa energía ha de ser radiada al exterior, lo que alarga su tiempo de enfriamiento. Así pues, entender en detalle estas transiciones de fase es un requisito indispensable para determinar la edad de las enanas blancas. Al respecto, existen dos fenómenos cruciales que deben ser considerados con detenimiento.

El primero de ellos ocurre cuando la enana blanca es líquida. Como mencionamos más arriba, una enana blanca típica se compone sobre todo de carbono y oxígeno, además de trazas de ^{22}Ne. Este isótopo cuenta con dos neutrones adicionales con respecto al neón ordinario (la mayoría de los elementos químicos ligeros, como el carbono y el oxígeno, tienen el mismo número de protones y de neutrones). En consecuencia, los núcleos de ^{22}Ne del interior de una enana blanca son más densos que la materia circundante y, debido a la intensa fuerza gravitatoria, se difunden lentamente hacia el centro de la estrella. Ello reorganiza la estructura interna de la enana blanca y libera energía gravitatoria que la estrella ha de radiar al espacio. El resultado es un retraso en el enfriamiento de la enana blanca.

El segundo tiene lugar a temperaturas aún más bajas, cuando el plasma de la estrella cristaliza. Los cálculos teóricos indican que la composición química del sólido difiere de la del líquido. En concreto, el sólido posee una mayor abundancia de oxígeno. Este elemento es más denso que el carbono, por lo que desciende hacia las regiones centrales de la estrella, un proceso que también libera energía gravitatoria y que, de nuevo, retarda el proceso de enfriamiento. Estas tres fuentes de energía (la aportada por la sedimentación del ^{22}Ne, el calor latente de fusión y la energía liberada durante la separación de las fases de carbono y oxígeno) habían sido predichas de forma teórica; sin embargo, nunca se había podido comprobar que fuera esta la secuencia de acontecimientos.

El caso de NGC 6791

NGC 6791 es un cúmulo estelar muy próximo al Sol y, por ello, muy bien estudiado. En particular, se han obtenido imágenes de sus estrellas hasta brillos extremadamente débiles, menores incluso que los correspondientes al final de la secuencia de enfriamiento de sus enanas blancas.

Durante largo tiempo la edad de este cúmulo ha sido objeto de controversia. Según los cálculos obtenidos usando las estrellas de la secuencia principal, ascendía a 8000 millones de años. Pero las estimaciones basadas en las enanas blancas arrojaban un resultado muy inferior: 6000 millones de años. Hasta ahora, no existía ninguna hipótesis plausible que diese cuenta de semejante discrepancia.

En fecha reciente, nuestro grupo de investigación demostró que dicha diferencia desaparecía si se tenían en cuenta los procesos de separación descritos arriba. Al considerar la energía liberada durante la sedimentación del ^{22}Ne, así como la correspondiente a la separación del carbono y el oxígeno durante la cristalización, la edad de las enanas blancas coincide con el resultado que arrojan las estrellas de la secuencia principal. Ello resuelve la discrepancia y corrobora las predicciones teóricas relativas a la física de plasmas densos.

—Enrique García Berro
Departamento de física aplicada
Universidad Politécnica de Cataluña

MEDIOAMBIENTE

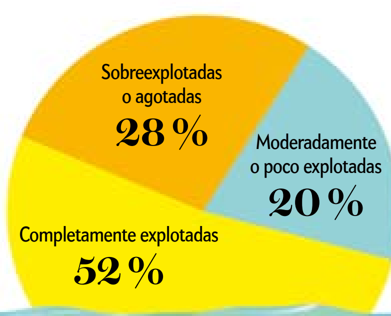
Mares silenciosos

Las pesquerías mundiales continúan desplomándose

Estamos vaciando los océanos de peces más rápidamente de lo que la mayoría de las especies pueden repoblarse. Sin embargo, existen ciertas medidas de control: establecer cuotas de captura más moderadas, restricciones en los días de captura o en los artes de pesca, y vedas de pesca en ciertas regiones y durante años. Todas estas prácticas de gestión comprobadas han ayudado a la recuperación de algunas poblaciones agotadas. La clave reside en la voluntad política para imponer prácticas mejores. Las aguas internacionales están poco controladas. En muchas aguas nacionales, los científicos establecen cuotas sostenibles, pero después, por razones comerciales o políticas, los «reguladores deciden que estas no son lo bastante elevadas desde el punto de vista comercial y las aumentan», explica Boris Worm, biólogo de la Universidad Dalhousie, en Halifax, Nueva Escocia. La pesca ilegal hace que la captura total sea todavía mayor.

—Mark Fischetti

Pesquerías globales



= 20.000 toneladas de peces reproductores

Sin controles
Atún rojo del Atlántico oriental
No se han impuesto límites científicos
La pesca ilegal es feroz
Derrumbe similar: grandes tiburones

Controles ineficaces
Bacalao de Terranova
Derrumbe similar: austromerluza negra

Pesquerías cerradas demasiado tarde

Algunas pesquerías cerradas

Restricción de los días de pesca

Controles estrictos
Eglefino del Banco Georges
Recuperación similar: salmón de Alaska

Allí donde se muestra un solo pez, la cantidad puede ser inferior a 20.000 toneladas

1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005

FAO (*pesquerías globales*); SERVICIO NACIONAL DE PESCA MARINA DE WOODS HOLE Y UNIVERSIDAD DE DALHOUSIE (*gráfica de evolución*)

GENÉTICA

Aminoácidos sintéticos

Un código genético artificial permite modificar las funciones de las proteínas

Hace ya poco más de una década que se intenta incorporar en proteínas aminoácidos no naturales. Estos se sintetizan de forma artificial y presentan propiedades que no se encuentran en la naturaleza: permiten uniones químicas con distintos compuestos orgánicos y muestran fluorescencia y fotosensibilidad.

En la actualidad, mediante técnicas de biología molecular e ingeniería genética, es posible incorporar dichos aminoácidos modificados en proteínas mediante la propia maquinaria celular. Ello permite no solo etiquetar proteínas para su estudio, sino también diseñar nuevas funciones proteicas con numerosas aplicaciones biotécnicas y terapéuticas.

El código genético universal

Nosotros y el mundo vivo que nos rodea estamos formados por las mismas moléculas. Moléculas que, a escala microscópica, constituyen complejos gigantes y conforman un universo celular. Los ácidos nucleicos (ADN y ARN) contienen la información genética indicativa de qué tipo de célula puede cada una llegar a ser. Las proteínas, las mas variadas y complejas dentro del grupo de las macromoléculas, son las que determinarán, según su presencia o ausencia en el momento y lugar precisos, cómo será esa célula y qué funciones desarrollará.

Si bien las proteínas presentan una variabilidad fabulosa, poseen estructuras de ingeniería diversa. Las hay tubulares, fibrosas, globulares e incluso desordenadas. Constan todas de las mismas unidades: los aminoácidos. Los aminoácidos naturales son 20. Las proteínas corresponden a cadenas compuestas por combinaciones de esos 20 aminoácidos, que determinan la estructura tridimensional y la función. Hay proteínas de tamaño reducido (30 aminoácidos), medio (200), de gran tamaño (3000) y complejos proteicos que albergan algunas decenas de estas últimas.

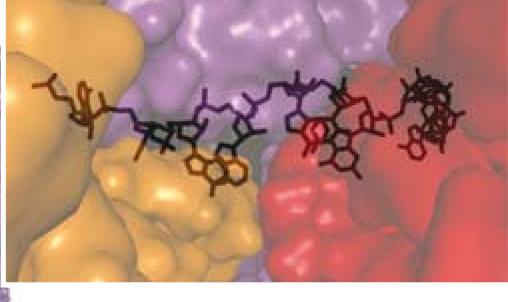
Pensemos en la variabilidad que podría presentar una proteína mediana, es decir, el número de combinaciones posibles de los 20 aminoácidos para las 200 posiciones disponibles: 20^{200}. En teoría, pues, habrían más tipos de proteínas que estrellas en el universo. Sin embargo, ello no sucede. El número de secuencias de aminoácidos presentes en la naturaleza es más bien acotado; y las secuencias existentes se hallan conservadas en las diferentes especies. ¿Por qué no hallamos en la naturaleza todas las hipotéticas secuencias aminoacídicas? La respuesta estriba en que una macromolécula debe poderse ensamblar, cumplir las leyes fisicoquímicas y sobrevivir a los procesos evolutivos de selección natural.

Ahora bien, ¿cómo se determinan las secuencias existentes de aminoácidos en las proteínas? La información almacenada en el ADN puede traducirse al idioma de las proteínas con un código que es el mismo para todos los organismos existentes. Fue descubierto a principios de los años sesenta del siglo pasado por Francis Crick. Se considera el «dogma central de la biología molecular». Según este, la información de los ácidos nucleicos se traslada a las proteínas mediante un código genético universal, compuesto de 64 combinaciones de tripletes de bases de ADN que codifican los 20 aminoácidos naturales (un aminoácido está representado por entre dos y seis tripletes) y señales de finalización de la traducción.

De tripletes a cuadrupletes

Hoy se conocen la estructura tridimensional de la maquinaria traductora del código genético. Ello permite «reprogramar» los intermediarios que participan



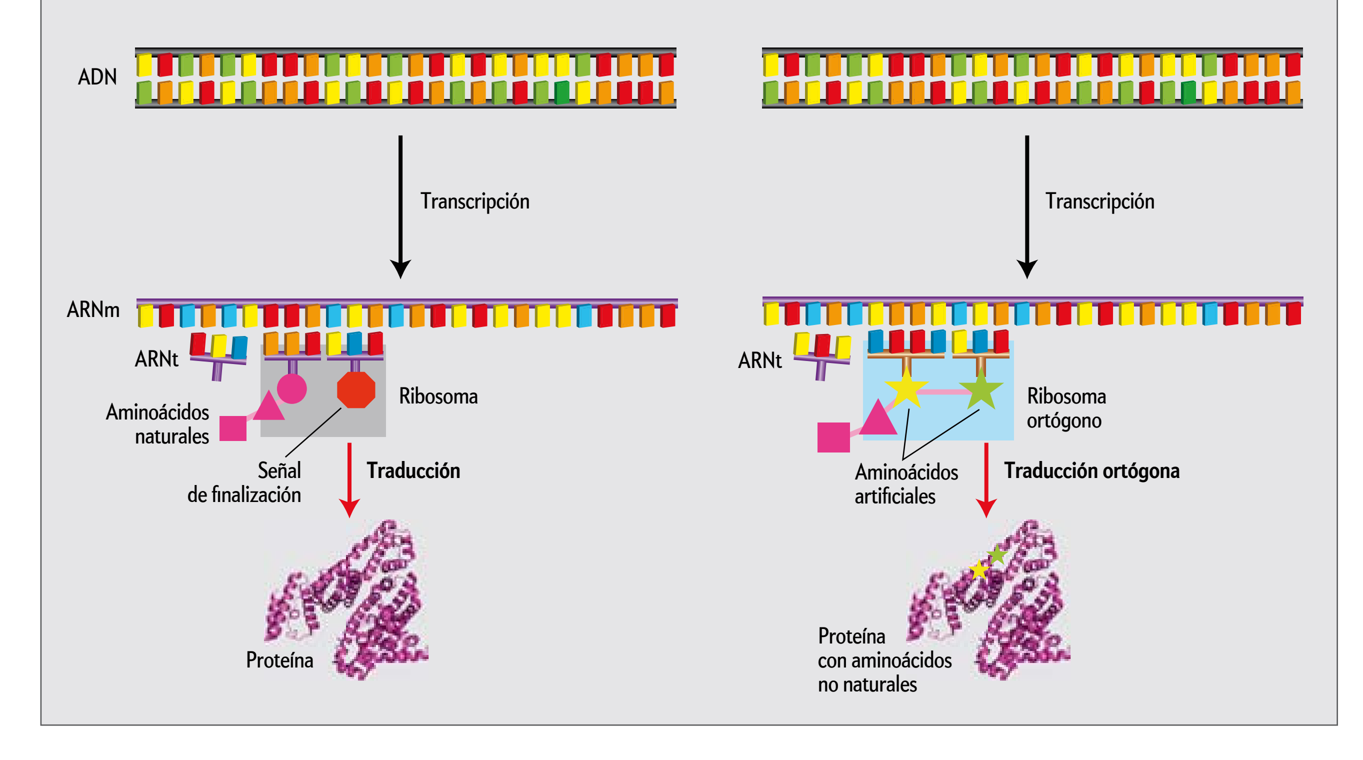


En esta estructura tridimensional de parte del ribosoma se observa el ARN ribosomal (*azul*), las proteínas ribosomales (*violeta*) y los ARN de transferencia acoplados (*naranja* y *rojo*). En la ampliación de la zona central (*inserto*) se visualiza el ARN mensajero (*negro*), que será traducido en el interior del ribosoma. La reprogramación de esta compleja maquinaria traductora permite incorporar en las proteínas aminoácidos no naturales.

EL ARTE DE ADORNAR PROTEÍNAS

Según el «dogma central» de la biología molecular, la información contenida en el genoma se traslada a las proteínas mediante un código genético universal, compuesto de 64 combinaciones de tripletes de bases de ADN (que codifican los 20 aminoácidos naturales) y señales de finalización. Durante la transcripción, se separaran las hebras de ADN; una de ellas sirve como molde para generar una molécula de ARN mensajero (ARNm). Las bases del ARNm son leídas de 3 en 3 por el ribosoma; este usa como traductores a los ARN de transferencia (ARNt) portadores de los aminoácidos, que son liberados y encadenados sucesivamente por el ribosoma dando lugar a una proteína.

Para introducir en una proteína aminoácidos no naturales, se emplean agentes intermediarios reprogramados: ARNt ortógono (ARNto) y ribosoma ortógono. Estos traducen la información del genoma mediante un lenguaje basado en «palabras» de 4 bases, o cuadrupletes. Pueden reprogramarse para incorporar un aminoácido no natural en lugar de una señal de finalización de la traducción. La introducción de aminoácidos artificiales permite sintetizar nuevas macromoléculas (etiquetadas, alteradas, fotoactivadas, etcétera) que arrojan luz sobre la estructura y la función proteínica



en la síntesis de las proteínas, de modo que podamos incorporar aminoácidos no naturales.

Mediante ingeniería genética hemos diseñado en el laboratorio de evolución y síntesis de funciones proteínicas, dirigido por Jason Chin, nuevos traductores que aceptan aminoácidos no naturales: en lugar de leer 3 bases del mensaje, leen 4, de modo que se expande el código genético de 64 elementos codificantes a 256. Hemos desarrollado también un nuevo ribosoma, denominado «ribosoma ortogonal», que funciona en paralelo al que existe en la célula. Tiene la capacidad de traducir proteínas que contienen aminoácidos no naturales, mediante el ensamblaje de un mecanismo complejo que permite descodificar un nuevo código genético. Publicamos los resultados de este trabajo en marzo de 2010 en *Nature*.

Esa herramienta permite incorporar aminoácidos artificiales y modificar, por tanto, determinados sitios funcionales de una proteína para generar, por ejemplo, enzimas superactivas. También facilita la introducción de «etiquetas» fluorescentes, que resultan de gran utilidad para observar, mediante microscopía, el comportamiento de las proteínas en el interior de una célula viva. Asimismo, las proteínas pueden adornarse con grupos fotosensibles, lo que permite controlar su función mediante el simple encendido y apagado de una lamparita.

Las proteínas maduras sufren en el interior de la célula modificaciones que pueden dar lugar al desarrollo de tumores y otras patologías. La técnica de los aminoácidos artificiales permite remedar estas alteraciones en el tubo de ensayo. Ello no solo expande el horizonte de la industria farmacéutica hacia el diseño de fármacos más específicos y robustos, sino que añade una nueva herramienta para el estudio de la función de estas modificaciones proteicas en procesos cancerígenos o infecciosos.

La expansión del código genético y la incorporación de aminoácidos no naturales da nacimiento una nueva biología sintética. Facilitará el desarrollo de moléculas terapéuticas más resistentes a la degradación celular y de una impensada variedad de materiales biosintéticos, como una nueva generación de polímeros y plásticos biodegradables. Todo ello gracias a una nueva maquinaria celular diseñada en el laboratorio y cuyo mecanismo evolutivo viene determinado por nada más que nuestra propia imaginación.

—María Marta García Alai
Laboratorio de biología molecular
Consejo de Investigación Médica (MRC)
Cambridge

PALEOANTROPOLOGÍA

Un final explosivo

Grandes erupciones volcánicas habrían causado la extinción de los neandertales

Una caverna en la zona norte de las montañas del Cáucaso podría ayudar a resolver el antiguo misterio sobre la extinción de los neandertales, nuestros parientes más próximos. Durante casi 300.000 años, los robustos y cejijuntos neandertales predominaron en Eurasia, donde sobrevivieron a las condiciones glaciales más extremas que ha soportado nunca nuestra especie. Posteriormente, hace unos 40.000 años, su número comenzó a reducirse. Hace unos 28.000 años, desaparecieron. Los paleoantropólogos vienen debatiendo desde hace tiempo si su extinción fue causada por la competencia que se estableció con los recién llegados humanos modernos o por los rápidos cambios del clima. Sin embargo, nuevos hallazgos sugieren que una serie de catastróficas erupciones volcánicas habrían provocado el fin de los neandertales y propiciado la sustitución de estos por los humanos modernos.



CHIP CLARK, PROGRAMA DE ORÍGENES HUMANOS, INSTITUCIÓN SMITHSONIANA

Un grupo de investigadores dirigido por Liubov Vitaliena Golovanova, del Laboratorio ANO de Prehistoria de San Petersburgo, estudió los depósitos de la cueva de Mezmaiskaya, en el sudoeste de Rusia. Descubierta por arqueólogos en 1987, albergó hace mucho tiempo a neandertales y, más tarde, a humanos modernos. Al analizar los diversos estratos, los científicos identificaron capas de ceniza volcánica que atribuyeron, basándose en la composición geoquímica del material, a erupciones sucedidas en la región del Cáucaso hace unos 40.000 años. Debido a que la cueva alberga abundantes pruebas sobre la ocupación de neandertales anterior a la acumulación de cenizas, pero ningún indicio posterior, el equipo ha deducido que las erupciones devastaron las poblaciones locales.

Además, tras examinar numerosos yacimientos en toda Eurasia, el equipo descubrió que las erupciones coincidieron con la desaparición de los neandertales en todas las zonas donde habitaban, excepto algunos grupos que se refugiaron en el sur. En un artículo publicado en *Current Anthropology*, los investigadores proponen que las erupciones desencadenaron un invierno volcánico que habría causado muertes masivas entre los neandertales y sus presas. Esta desgracia para los neandertales supuso, en cambio, un golpe de suerte para los humanos modernos, que vivían en zonas más meridionales no afectadas por la actividad volcánica. Según esta teoría, una vez extinguidos los neandertales, los humanos modernos pudieron trasladarse al norte sin dificultad.

La interpretación del grupo ruso sobre los hallazgos de la cueva ha suscitado la crítica de otros investigadores, como Francesco G. Fedele, de la Universidad de Nápoles, quien afirmó, en los comentarios publicados junto al artículo, que el dato de la antigüedad de las cenizas carecía de suficiente solidez para extraer tal conclusión. Otros, sin embargo, como Paul B. Pettitt, de la Universidad de Sheffield, consideraron verosímil el nuevo escenario de extinción y sustitución. El enigma de la caída de los neandertales está lejos de ser resuelto, pero la teoría de las erupciones volcánicas podría estimular las investigaciones sobre el tema.

—Kate Wong



EN SÍNTESIS

El consumo de carne está aumentando en todo el mundo, pero su producción exige gran cantidad de energía y agua, y conlleva emisiones. Además, las pesquerías se hallan en declive. La acuicultura podría convertirse en la fuente más sostenible de proteína para los humanos.

Las granjas de pescado proporcionan ya la mitad de los productos marinos del mundo. La mayoría de ellas se sitúan en zonas costeras, lo que genera una notable contaminación del agua.

Las jaulas ancladas al fondo marino, lejos de la costa, resultan más limpias. Las granjas oceánicas, junto con las nuevas formas de cultivo y las operaciones costeras menos contaminantes ayudarían a promover la acuicultura.

Queda por determinar la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica de las nuevas estrategias.

La cría de peces en jaulas situadas en aguas abiertas, como la de serviolas de Kona Blue Water Farms, en Hawai, ofrece una fuente de proteínas para el consumo humano y representa un método más sostenible que la captura de peces en libertad o la ganadería.

SOSTENIBILIDAD

La revolución azul

Nuevas piscifactorías en el mar abierto e instalaciones costeras de bajo impacto ambiental pueden ofrecer al mundo gran parte del suministro proteico

Sarah Simpson



Sarah Simpson es escritora independiente. Colabora con *Scientific American*, sobre todo en artículos relacionados con el medio ambiente.

Neil Sims se dedica a sus alborotados animales con la misma abnegación que cualquier otro granjero. Pero para controlar a su manada, Sims no ensilla su caballo, como hacen los ovejeros australianos entre los que se crió, sino que utiliza máscara de buceo y tubo. Supervisa así 480.000 peces plateados confinados a media milla de la costa de Kona, frente a la mayor de las islas Hawai.

Oculta discretamente bajo las olas, la granja de Sims representa una de las veinte operaciones en el mundo que intentan explotar el último de los grandes ámbitos del planeta: el océano abierto. Esta ubicación ofrece ventajas notables sobre la utilizada por miles de piscifactorías tradicionales, una flotilla de jaulas a poca distancia de la costa. Esas granjas a menudo anticuadas, consideradas antinaturales y contaminantes, exudan excrementos de peces y restos de alimento que enturbian las calmadas y someras aguas donde se sitúan, lo que origina peligrosas proliferaciones de fitoplancton o impide la vida marina bajo sus redes. Sims explica que la contaminación no supone un problema en las aguas abiertas aprovechadas por Kona Blue Water Farms. Las siete jaulas subacuáticas, cada una de ellas del tamaño de un polideportivo, están ancladas en lugares con una corriente veloz que arrastra y diluye cualquier residuo hasta niveles inocuos.

Con la intención de verificar las palabras de Sims, me coloco sobre la borda de su embarcación auxiliar, equipada con aletas de bucear, máscara y tubo, y me lanzo al agua. Observo allí las jaulas, formadas por dos conos unidos por la base, que resplandecen a causa de la reflexión de los rayos solares en la estructura y las centelleantes figuras de los peces. Al tacto, el tenso material que envuelve el armazón exterior de las jaulas recuerda más una valla que una red. Este resistente material, similar al kevlar, repelería cualquier ataque de los tiburones a la masa de peces *Seriola rivoliana*, una especie local de serviola o pez limón domesticada por Kona Blue como una alternativa al atún salvaje.

¿Por qué cultivar serviolas? Muchas pesquerías de atún se están agotando y la serviola de calidad, destinada a la elaboración de sushi, alcanza un elevado precio de mercado. Sims y su socio, el biólogo marino Dale Sarver, fundaron Kona Blue en 2001 para el cultivo sostenible de peces de interés comercial. Pero los métodos de la empresa también podrían aplicarse a la producción de pescado de consumo masivo, algo realmente necesario. La población mundial, hoy de 6900 millones habitantes, podría ascender hasta 9300 millones en el año 2050 y, además, el consumo de pescado y marisco aumenta de forma paralela a la mejora del nivel de vida. En cambio, los desembarques de las pesquerías extractivas se han estancado o han disminuido durante la última década. Criar vacas, cerdos, pollos y otros animales terrestres consume ingentes cantidades de terreno y agua dulce, además de combustibles fósiles que contaminan el aire y de abonos que, al ser lavados, deterioran ríos y océanos.

¿Cómo conseguir las proteínas necesarias para alimentar a la humanidad? La respuesta podría residir en las nuevas piscifactorías en aguas abiertas, si funcionan de forma eficiente, y también en las piscifactorías costeras, si logran operar sin contaminar.

PRÁCTICAS MÁS LIMPIAS

Para algunos científicos, la única manera de satisfacer la demanda mundial de alimentos consiste en trasladar al mar la producción de proteína animal. Pero si una revolución azul ha de proporcionar un manjar tan preciado, debe hacerlo de forma respetuosa con el entorno e informar sobre sus ventajas a la población y a los políticos con capacidad de frenar o acelerar su expansión.

En el pasado, las críticas a la acuicultura tenían cierta justificación. Cuando esa práctica nació hace 30 años en las zonas costeras, casi nadie actuaba de forma correcta con respecto al ambiente o a la sostenibilidad del propio sector a largo plazo. La gestión de los residuos de las granjas representaba solo uno de los problemas no resueltos. Los cultivadores de langostinos del sudeste asiático y de México talaron los manglares para construir los estanques de cría. En las granjas europeas y estadounidenses, los salmones estaban tan hacinados que las enfermedades y parásitos se propagaban con facilidad entre ellos. A veces, los peces huidos de las granjas transmitían esas enfermedades a las pobla-

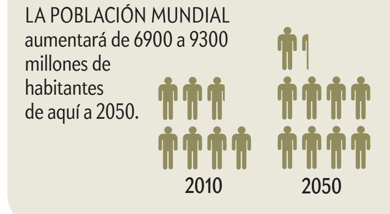
MASA USHIODA *CoolWaterPhoto.com (páginas anteriores)*

ALIMENTAR A LA HUMANIDAD

Origen de la proteína:

La demanda de proteína aumenta

LA POBLACIÓN MUNDIAL aumentará de 6900 a 9300 millones de habitantes de aquí a 2050.

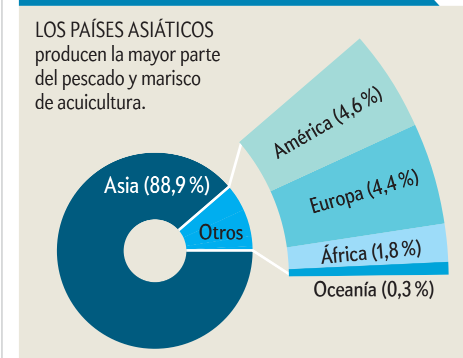


EL ÁREA DE CULTIVOS Y PASTOS deberá aumentar entre el 50 % y 70 % (si no varía su rendimiento) para satisfacer la demanda de alimento en 2050. Puede que esas tierras no existan.



¿Quién puede abastecerla?

LOS PAÍSES ASIÁTICOS producen la mayor parte del pescado y marisco de acuicultura.



LA ACUICULTURA produce el 47 % del pescado y marisco consumido en el mundo. Si continúa creciendo al ritmo actual del 7,4 % anual, y la agricultura continúa haciéndolo al 2,0 % anual, en 2050 podría satisfacer de modo sostenible el 62 % de la demanda proteica mundial.

ciones salvajes de peces. Para empeorar aún más las cosas, la industria acuícola generaba, y aún lo hace, un balance negativo en la biomasa disponible de pescado. Los peces de gran tamaño de las granjas, de sabor preciado y alto valor en el mercado, se alimentan con pienso procedente de la captura masiva de pequeños peces de bajo valor comercial, que a su vez constituyen el alimento básico de los peces en libertad de gran tamaño.

Sin duda, esas deficiencias repercutían sobre la propia industria, por lo que el sector ha debido buscar soluciones innovadoras. La estrategia de Kona Blue de ubicar su granja en una zona de aguas abiertas sometida a fuertes corrientes es un ejemplo de ello. Otros acuicultores están empezando a cultivar cerca de las jaulas algas y animales filtradores, como los moluscos, con el fin de absorber los residuos. En todo el sector, incluidas las granjas de agua dulce, las mejoras en el manejo de los animales y en la formulación de los piensos, con una menor proporción de harina de pescado, están promoviendo el crecimiento de los peces y disminuyendo los casos de enfermedad. De todos modos, todavía puede pasar tiempo hasta que los grupos ecologistas retiren los productos de acuicultura de sus listas de alimentos no recomendados.

Algunos visionarios están realizando propuestas realmente osadas. La jurisdicción de los estados costeros se extiende sobre las aguas situadas a menos de 200 millas náuticas (unos 370 kilómetros) de sus costas, una vasta superficie no aprovechada por la acuicultura. En Estados Unidos, esa superficie asciende a 3,4 millones de millas náuticas cuadradas. Las jaulas sumergidas, impulsadas por grandes hélices, podrían desplazarse por las principales corrientes oceánicas y regresar meses más tarde al punto de partida o a cualquier otro destino, por lejano que fuera, para ofrecer su cargamento de pescado fresco al mercado.

A finales de 2008, el ingeniero marino Clifford Goudey botó frente a Puerto Rico la primera jaula sumergible y autopropulsada. Con la forma de una esfera geodésica de algo más de 20 metros de diámetro, la jaula demostró una sorprendente maniobrabilidad una vez equipada con un par de hélices de casi tres metros cada una. Goudey, antiguo director del Centro de Ingeniería Acuícola del Instituto Tecnológico de Massachusetts, imagina la botadura de docenas de granjas móviles y su pausada navegación en el seno de la corriente que, de modo invariante, emplea nueve meses en recorrer el Caribe.

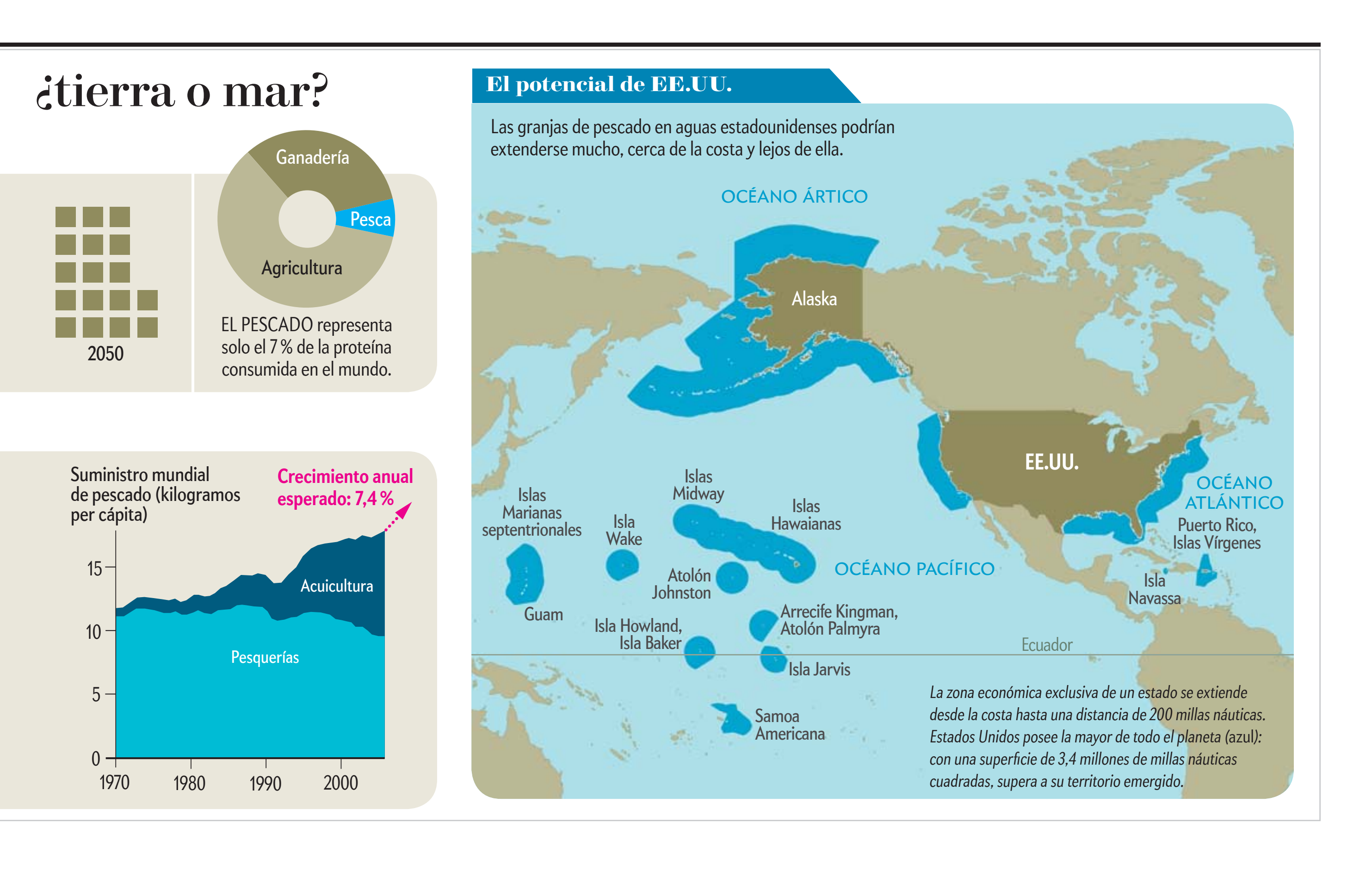
ALIMENTAR A LOS PECES

El inconveniente de la acuicultura marina más difícil de resolver es el empleo de especies salvajes de tamaño reducido para alimentar a las especies de las granjas. Los peces pequeños no se cultivan a propósito, pues ya existe una industria dedicada a capturarlos y transformarlos en aceite y harina de pescado.

El 30 por ciento del alimento utilizado en Kona Blue es anchoveta peruana triturada. Sims comenta que la serviola podría sobrevivir con una dieta vegetariana, pero no la hallaría apetecible. Además, su carne no contendría todos los ácidos grasos y aminoácidos que contribuyen a hacerla saludable. Los ingredientes para el pienso proceden del aceite y la harina de pescado. Y ahí radica el problema. «A menudo nos ridiculizan porque matamos peces para engordar a otros», dice Sims. El cultivo del salmón, realizado en granjas costeras, desencadena la misma cólera.

Los detractores de esa práctica temen que la incesante demanda de las piscifactorías termine con las poblaciones de anchoas, sardinas y otros peces pequeños. Antes del inicio de la acuicultura moderna, la mayor parte de la harina de pescado

FUENTE DE LAS GRÁFICAS: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO); ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE LA ATMÓSFERA Y EL OCÉANO (NOAA)



se destinaba al engorde de cerdos y pollos, pero actualmente la acuicultura consume el 68 por ciento de la misma. Sin embargo, las nuevas formulaciones de piensos han reducido esa proporción. Cuando Kona Blue empezó a cultivar serviolas en 2005, el granulado que utilizaba estaba compuesto en un 80 por ciento por anchoveta peruana. En 2008, la empresa había reducido ese valor a un 30 por ciento, sin haber sacrificado el sabor ni las propiedades saludables del producto final, según Sims, gracias a la mayor proporción de harina de soja y la adición de grasa de pollo, un subproducto del procesado industrial de esas aves. Los nuevos gránulos representan un gran avance frente a la práctica de alimentar a los peces con sardinas. Desgraciadamente, ese hábito despilfarrador continúa entre los piscicultores menos responsables.

Los empresarios con una visión más global se plantean el objetivo de lograr un factor de transformación del pienso próximo a la unidad, lo que equivaldría a producir la misma cantidad de pescado que la utilizada para alimentarlo. Los productores de peces de agua dulce, como la tilapia y el pez gato, o bagre, ya han alcanzado esta proporción deseable, pero aún no sucede así en la piscicultura marina. El 70 por ciento del pienso utilizado por Kona Blue está compuesto por proteína y aceite de origen vegetal, por lo que solo necesitan entre 1,6 y 2 kilos de anchoveta peruana para producir un kilo de serviola. El promedio del índice de transformación en la industria salmonera se sitúa en torno a 3. Para no generar una pérdida neta de proteína marina, la industria debería reducir el índice notablemente. De todos modos, se debe tener presente que el pescado de piscifactoría consume solo una pequeña fracción de lo que consumen sus parientes salvajes. Así, a lo largo de su vida, un atún en libertad necesita hasta 100 kilogramos de alimento, compuesto únicamente por peces, para producir un kilogramo de su cuerpo.

La presión para reducir las capturas de sardina y anchoa se intensificará a medida que aumente el número de piscifactorías. La acuicultura es el sector de producción alimentaria con la mayor tasa de crecimiento: se expande un 7,5 por ciento al año desde 1994. A este ritmo, la disponibilidad de harina y aceite de pescado se agotará en 2040. Urge pues eliminar por completo los productos de la pesca de los piensos, objetivo que debería alcanzarse durante el próximo decenio, según el ecólogo marino Carlos M. Duarte, director del Laboratorio Internacional para el Cambio Global, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en Mallorca.

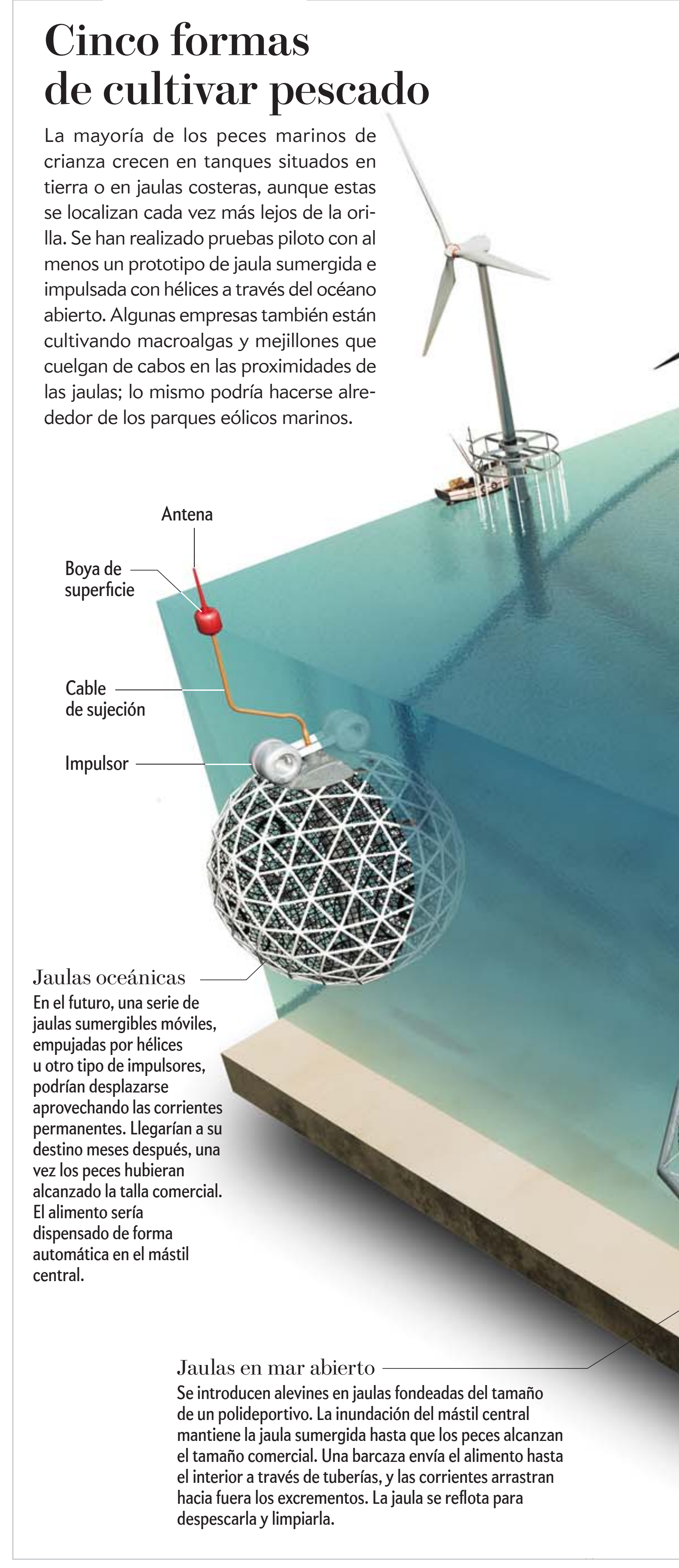
Un avance que ayudaría a lograrlo consistiría en obtener de las algas microscópicas el codiciado ácido graso docosahexaenoico (DHA), perteneciente al grupo de los omega-3. Ello permitiría reducir una parte de los derivados de pescado de los piensos. La empresa Advanced BioNutrition, situada en Columbia (Maryland), está evaluando piensos enriquecidos con el mismo DHA de origen algal que ya se ha utilizado para mejorar las papillas, la leche y los zumos disponibles en el supermercado. En tiempo reciente, investigadores de la Organización de Investigación Científica e Industrial (CSIRO) de Australia obtuvieron DHA de plantas terrestres. Duarte piensa que la intensa competencia por el suelo agrícola y el agua dulce obligará también a los piscicultores a eliminar de los piensos la soja, el aceite de pollo y otros productos de origen terrestre; asimismo, deberán alimentar a sus cardúmenes con zooplancton y macroalgas fáciles de cultivar. En realidad, las macroalgas ya representan casi un cuarto del valor total de la acuicultura marina.

A pesar de las mejoras de la acuicultura marina, eminentes ambientalistas y académicos arremeten todavía contra ella. El

ACUICULTURA

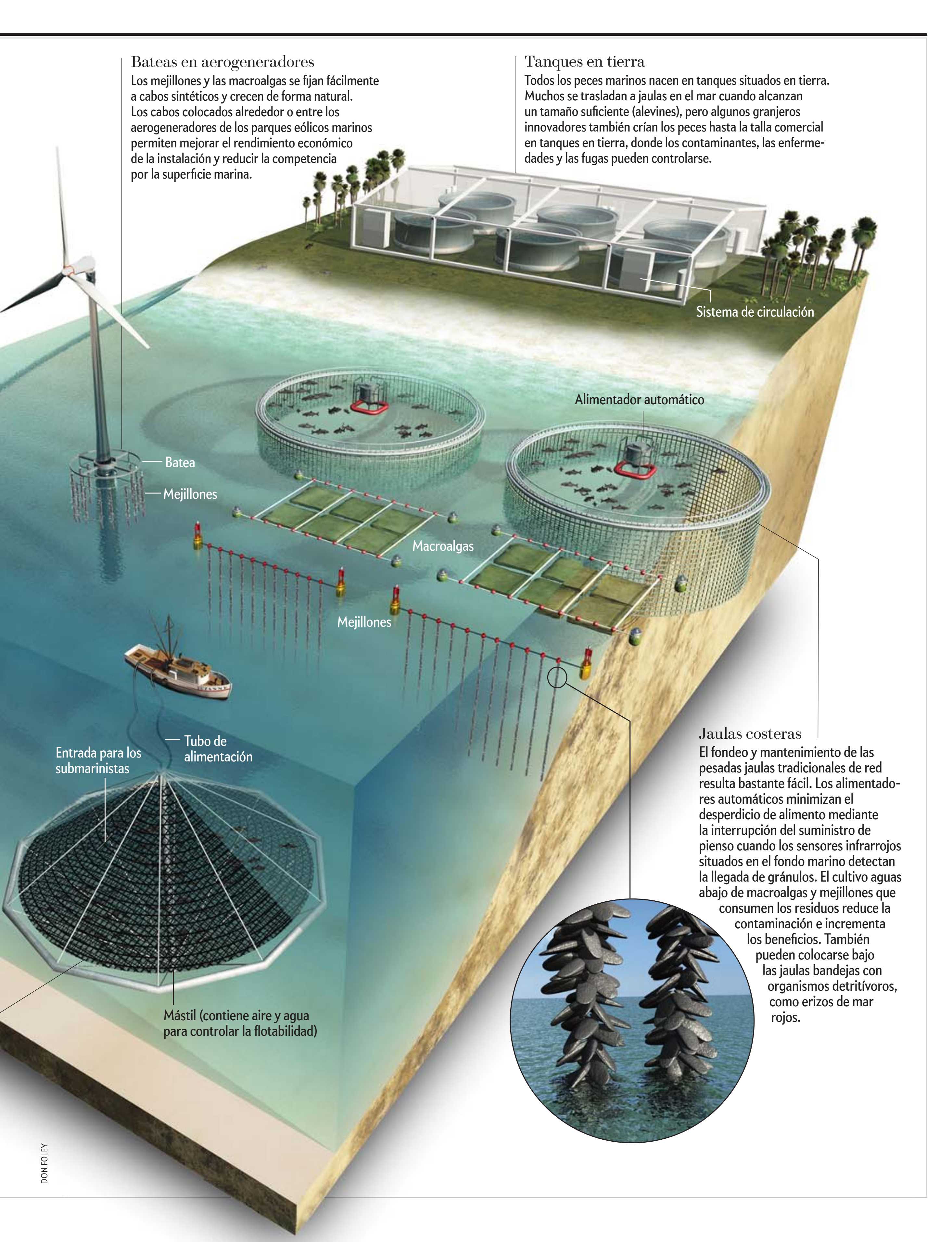
Cinco formas de cultivar pescado

La mayoría de los peces marinos de crianza crecen en tanques situados en tierra o en jaulas costeras, aunque estas se localizan cada vez más lejos de la orilla. Se han realizado pruebas piloto con al menos un prototipo de jaula sumergida e impulsada con hélices a través del océano abierto. Algunas empresas también están cultivando macroalgas y mejillones que cuelgan de cabos en las proximidades de las jaulas; lo mismo podría hacerse alrededor de los parques eólicos marinos.



Jaulas oceánicas
En el futuro, una serie de jaulas sumergibles móviles, empujadas por hélices u otro tipo de impulsores, podrían desplazarse aprovechando las corrientes permanentes. Llegarían a su destino meses después, una vez los peces hubieran alcanzado la talla comercial. El alimento sería dispensado de forma automática en el mástil central.

Jaulas en mar abierto
Se introducen alevines en jaulas fondeadas del tamaño de un polideportivo. La inundación del mástil central mantiene la jaula sumergida hasta que los peces alcanzan el tamaño comercial. Una barcaza envía el alimento hasta el interior a través de tuberías, y las corrientes arrastran hacia fuera los excrementos. La jaula se reflota para despescarla y limpiarla.


Bateas en aerogeneradores
Los mejillones y las macroalgas se fijan fácilmente a cabos sintéticos y crecen de forma natural. Los cabos colocados alrededor o entre los aerogeneradores de los parques eólicos marinos permiten mejorar el rendimiento económico de la instalación y reducir la competencia por la superficie marina.
Tanques en tierra
Todos los peces marinos nacen en tanques situados en tierra. Muchos se trasladan a jaulas en el mar cuando alcanzan un tamaño suficiente (alevines), pero algunos granjeros innovadores también crían los peces hasta la talla comercial en tanques en tierra, donde los contaminantes, las enfermedades y las fugas pueden controlarse.
Sistema de circulación
Alimentador automático
Batea
Mejillones
Macroalgas
Mejillones
Entrada para los submarinistas
Tubo de alimentación
Mástil (contiene aire y agua para controlar la flotabilidad)
Jaulas costeras
El fondeo y mantenimiento de las pesadas jaulas tradicionales de red resulta bastante fácil. Los alimentadores automáticos minimizan el desperdicio de alimento mediante la interrupción del suministro de pienso cuando los sensores infrarrojos situados en el fondo marino detectan la llegada de gránulos. El cultivo aguas abajo de macroalgas y mejillones que consumen los residuos reduce la contaminación e incrementa los beneficios. También pueden colocarse bajo las jaulas bandejas con organismos detritívoros, como erizos de mar rojos.
DON FOLEY



La serviola de crianza crece con mayor eficiencia que los peces en libertad, puesto que estos últimos invierten una enorme cantidad de energía en buscar alimento y huir de los depredadores.

MASA USHIODA *CoolWaterPhoto.com*

ecólogo marino Jeremy Jackson, del Instituto Scripps de Oceanografía de EE.UU., expresa su «oposición frontal» al cultivo de peces carnívoros y de camarones y, en general, de cualquier pez consumido finalmente como sashimi. Califica esta práctica de «ambientalmente catastrófica», debido a la presión que ejerce sobre la alimentación de los peces en libertad, e insiste en que debería ser «ilegal».

MEJOR QUE ENGORDAR VACUNO

Jackson, respaldado por otros críticos, plantea que el riesgo de colapso de las pesquerías destinadas a pienso, ya sobreexplotadas, es demasiado elevado para justificar la producción de un alimento de lujo que la mayoría de la humanidad no probará nunca. Sería mucho mejor comer directamente peces herbívoros, como las sardinas y las anchoas, en lugar de criar depredadores apicales.

Sims concuerda en la necesidad de *pescar* preferentemente especies de bajo nivel trófico, aunque ello no signifique que debamos *comer* también esas especies. «Seamos realistas. Yo tomo anchoas en la pizza, pero no lograré que nadie más de mi familia lo haga», afirma. «Si se produce un kilogramo de sushi de crianza por cada kilogramo de anchovetas destinadas a pienso, ¿por qué no ofrecer a la población lo que desea?»

Algunas personas critican el consumo de pescado, sea salvaje o criado en piscifactorías, partiendo de la idea de que la salud del planeta y de sus habitantes mejoraría si los humanos ingiriéramos más alimentos de origen vegetal. Pero la sociedad no se halla muy predispuesta al vegetarianismo. Un número creciente de personas comen cada vez más carne, especialmente en los países en desarrollo, donde la población está mejorando el nivel de vida, se vuelve más urbana y copia el estilo de vida occidental. Como consecuencia, la Organización Mundial de la Salud predice para 2025 un incremento del consumo per cápita de carne del 25 por ciento. Incluso si el consumo se estabilizara, la superficie dedicada a la agricultura y al pastoreo (si no varía su rendimiento) debería incrementarse entre el 50 y el 70 por ciento de aquí a 2050 para producir el alimento necesario.

Esta realidad exige una comparación que pocas veces se hace: piscicultura frente a ganadería. Si se actúa bien, la piscicultura puede satisfacer gran parte de la demanda humana de proteína, al tiempo que minimiza la expansión de la agricultura y los costes ambientales asociados.

Los agricultores ya han trasformado el 40 por ciento de la superficie terrestre. Tras 10.000 años de experiencia, los problemas importantes aún persisten. El ganado vacuno consume enormes cantidades de cultivos que se abonan en exceso, y las granjas de cerdos y pollos constituyen importantes focos de contaminación. Las zonas muertas que se originan bajo las piscifactorías costeras representan un mal menor en comparación con las generadas por la escorrentía de fertilizantes agrícolas en el golfo de México, el mar Negro y otras partes, o con las dañinas proliferaciones algales provocadas en la bahía de Chesapeake por los efluentes de las granjas porcinas.

El análisis comparativo del impacto ambiental de los diferentes sistemas de producción de proteínas va cobrando cada vez mayor importancia. Se pretende que la sociedad «se esfuerce en la resolución de los problemas más acuciantes», escribe Kenneth M. Brooks, consultor independiente sobre ecosistemas acuáticos radicado en Port Townsend (Washington). Brooks estima que la cría de ganado vacuno de la raza Angus requiere 4400 veces más tierra de pasto de alta calidad que la producción equivalente de salmón atlántico de crianza, aunque en este último caso el recurso utilizado sea el fondo marino y no verdes prados. Además, el ecosistema situado bajo una piscifactoría de salmones puede recuperarse en menos de un decenio, mientras que la regeneración forestal en las zonas ocupadas por los pastos puede tardar siglos.

Trasladar al mar la producción de proteína de origen animal permitiría mitigar el déficit creciente de agua dulce. Tal como señala Duarte, la ganadería produce solo el 3,5 por ciento del alimento consumido por los humanos, pero gasta el 45 por ciento del agua empleada por la agricultura. Si se obtuviera la mayor parte de la proteína en el océano, la producción agrícola podría aumentar notablemente sin superar los actuales niveles de consumo de agua.

Obviamente, producir y transportar harina de soja y aceite de pollo consume energía y genera emisiones, y lo mismo sucede con la distribución del pienso a los peces. El consumo de combustible y el volumen de emisiones ascienden en las granjas más alejadas de la costa, pero las piscifactorías de cualquier tipo son más eficientes que la mayor parte de las flotas pesqueras. Actualmente, la crianza de peces en aguas abiertas solo resulta rentable si se cultivan especies de elevado valor comercial, pero los costes pueden reducirse: un puñado de granjas experi-

mentales está produciendo de forma competitiva mejillones en aguas abiertas.

ETIQUETAS VERDES

Si la demanda proteica mundial se puede satisfacer en gran parte con el pescado, ¿por qué simplemente no pescamos más? Ante el crecimiento explosivo de la población mundial y la demanda per cápita de pescado, muchas pesquerías se están agotando. Los estadounidenses, por ejemplo, siguen el consejo de los expertos en salud y aumentan el consumo de pescado para reducir el riesgo de infarto y mejorar la función cerebral.

Por si fuera poco, las flotas pesqueras utilizan enormes cantidades de combustible y emiten gases de efecto invernadero y otros contaminantes. El uso generalizado de sistemas de pes-

ACUICULTURA EN ESPAÑA

Un sector en auge

El rápido crecimiento de la producción acuícola plantea nuevos retos ambientales

ENRIC GISBERT

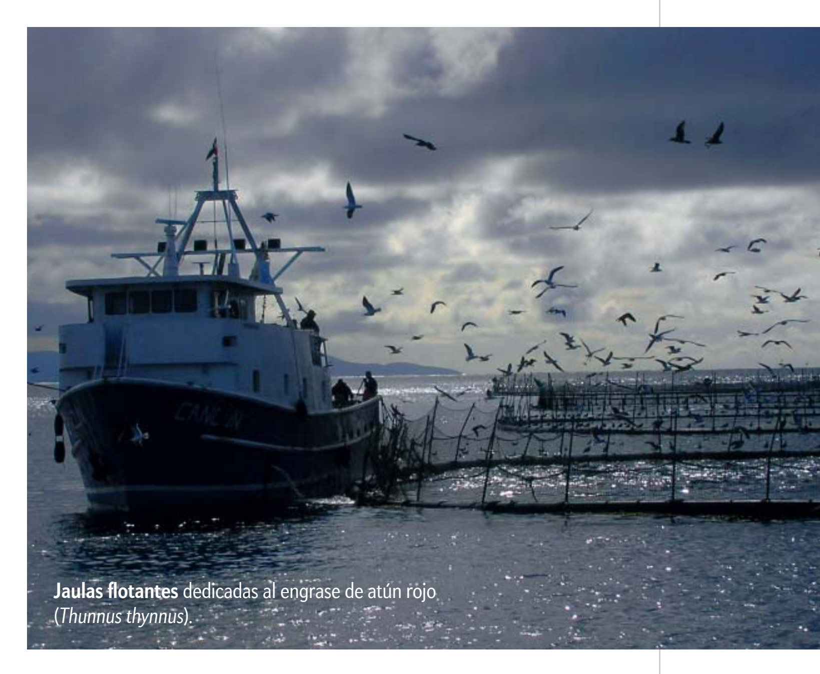
Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, en 2008 la pesca y la acuicultura suministraron al mundo unos 142 millones de toneladas de pescado, un máximo histórico. La acuicultura generó el 46 por ciento de ese pescado. A escala europea, la contribución de la acuicultura al total de la producción de pescado ascendió en 2008 al 19,8 por ciento (1.277.800 toneladas).

España es el estado de la UE con la mayor producción acuícola: 249.070 toneladas en 2008; le siguen Francia (237.870 toneladas) e Italia (181.470 toneladas). Somos también uno de los mayores consumidores de pescado, con una demanda que ronda los 37 kilogramos por persona y año (el promedio mundial se sitúa entorno a los 17 kilogramos por habitante y año). Según la Asociación Empresarial de Productores de Cultivos Marinos (APROMAR), en nuestro país la acuicultura supera ya a la pesca en relevancia económica y social.

Hasta la década de los ochenta, la producción acuícola española se concentró en unas pocas especies repartidas en pequeñas empresas familiares, siendo tres los cultivos más característicos: el mejillón en las rías gallegas, la trucha arco iris en instalaciones continentales y la acuicultura en esteros en la zona de marismas del río Guadalquivir. A partir de los años noventa, con la aplicación de nuevas técnicas y una mayor industrialización y profesionalización del sector, se incorporaron nuevas especies, como el rodaballo en el norte, y la dorada y la lubina en el sur y levante de la península e islas Canarias. La distribución de especies se halla condicionada por las características de las aguas costeras y continentales de cada zona.

En la cornisa cantábrica y la región noroeste, se ha desarrollado el cultivo de especies marinas de agua fría, sobre todo moluscos (mejillón y ostras en bateas, y almejas y berberechos en parques de cultivo), rodaballo y lenguado en instalaciones en tierra con aporte de agua de mar y sistemas de recirculación del agua altamente tecnificados. La producción española de rodaballo representa cerca del 83 por ciento del total producido en Europa. El cultivo de mejillón en las rías gallegas ha situado a España en el segundo puesto de la producción mundial después de China. Entre los cultivos secundarios destacan el de pectínidos (zamburiña, vieira y volandeira) y, de forma emergente, el de pulpo, besugo y abadejo.

En la zona mediterránea y sur atlántica, de aguas más templadas, la producción se centra básicamente en la dorada y la lubina. A nivel mediterráneo, los principales productores de dorada son Grecia, Turquía y España (se cultiva también en otros trece países). En el caso de la lubina, encabezan la producción Turquía y Grecia, a las que sigue España (otros 16 países del arco mediterráneo cultivan lubina, pero de forma muy minoritaria). Dorada y lubina se cultivan sobre todo en jaulas flotantes, aunque en la región sur atlántica existen explotaciones en tierra basadas en antiguas salineras, que han sido reconvertidas en estanques de cultivo. Las comunidades autónomas de Cataluña, Comunidad Valenciana, Canarias y Andalucía son las que lideran la acuicultura de estas especies, si bien el cultivo de la corvina y el atún rojo (engrase) en jaulas flotantes se ha ido implantado con fuerza en estas zonas. El cultivo del mejillón, ostra japonesa y almeja japonesa, y de forma secundaria el pulpo, centran la producción de moluscos en aguas costeras mediterráneas, siendo la zona del delta del Ebro la segunda en importancia en producción de moluscos bivalvos, sobre todo mejillón, después de Galicia.



Jaulas flotantes dedicadas al engrase de atún rojo (*Thunnus thynnus*).

ENRIC GISBERT

La acuicultura actual se enfrenta, pues, a un importante desafío: aliviar la presión ejercida por la pesca extractiva sobre las poblaciones de peces para satisfacer de manera sostenible la demanda creciente de productos del mar. Para lograrlo, deberán superarse varios retos: entre otros, la ordenación racional de usos de espacios de dominio público a lo largo de la costa, la mejora de los sistemas de producción y alimentación de las especies cultivadas y el cierre en cautividad del ciclo biológico de especies en peligro de extinción como el atún rojo o la anguila europea.

Enric Gisbert
Programa de cultivos acuícolas
Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias

ca poco selectivos, como el arrastre y el dragado, termina con la vida de millones de animales. Los datos indican que al menos la mitad de los animales marinos capturados de este modo se descartan por no alcanzar un tamaño mínimo, superar las cuotas autorizadas o carecer de valor comercial. Con demasiada frecuencia, estos animales se devuelven al mar ya muertos. La acuicultura se deshace también de ellos: «Los piscicultores solo capturan los peces del interior de sus jaulas», remarca Sims.

Goudey señala otra cuestión a menudo ignorada: criar peces puede resultar más eficiente que capturarlos. Los peces de crianza transforman el alimento en carne de forma más efectiva que sus parientes en libertad, que deben emplear enormes cantidades de energía en cazar su comida, escapar de los depredadores, buscar pareja y reproducirse. En comparación, la vida es mucho más fácil para los peces de crianza, que invierten la mayor parte de su dieta en crecimiento.

Las serviolas de Kona Blue y la mayor parte de los salmones de crianza se sacrifican cuando alcanzan entre uno y tres años, una tercera parte de la edad de los atunes en libertad destinados a la elaboración de sushi. El menor tiempo de crecimiento conlleva una menor acumulación de mercurio y otros contaminantes persistentes que convierten el atún y el pez espada adultos en potencialmente peligrosos para la salud.

En la actualidad, la piscicultura produce el 47 por ciento del pescado y el marisco consumido en el mundo, valor muy superior al 9 por ciento de 1980. Los expertos predicen que en 2050 la proporción aumentará hasta el 64 por ciento del suministro total de proteína. «No cabe duda de la importancia actual y futura de la acuicultura. Quienes se oponen a ella no captan su valor real», afirma José Villalon, director de acuicultura del Fondo Mundial para la Vida Salvaje (WWF). Fijarse solo en los aspectos negativos de la acuicultura sin tener en cuenta los inconvenientes de otros métodos de producción alimentaria representa un error. La piscicultura altera el entorno y, por muchas mejoras que se introduzcan, los problemas no desaparecerán por completo. Pero todos los sistemas de producción de alimento tienen un coste ambiental. Los impactos generados por la pesca extractiva y la cría de ganado vacuno, porcino o volatería son aún mayores.

Para estimular las buenas prácticas y diferenciar las piscifactorías limpias de las más contaminantes, WWF ha contribuido a la fundación del Consejo de Custodia de la Acuicultura con el fin de establecer normas globales de buenas prácticas y certificar, mediante auditores independientes, a las granjas que cumplan con sus recomendaciones. El presente año se prevé la publicación de las primeras normas del Consejo. Este organismo cree que, en lugar de imponer duras restricciones a miles de productores, la certificación impulsará a los 100 o 200 mayores distribuidores de pescado y marisco del mundo a comprar a los productores certificados.

El director de acuicultura de Ocean Conservancy, George Leonard, reconoce la utilidad de este tipo de programas de certificación para empujar a los piscicultores a buscar métodos de producción más sostenibles. Tal como sucede en cualquier industria global, los proveedores baratos y sin escrúpulos siempre existirán. Establecer unas normas mínimas obligará a los piscicultores estadounidenses a comportarse de forma responsable sin impedirles competir.

Esa cuestión resulta clave. Solo cinco de las 20 piscifactorías del mundo en mar abierto se hallan en aguas estadounidenses. Goudey piensa que el negocio atraería a más inversores si el país estableciera un sistema de licencias para las aguas federales, situadas entre 3 y 200 millas náuticas de la costa. «Ningún inversor respaldará una operación sin una normativa que garantice los derechos sobre la ocupación de las aguas donde se ubica la granja», afirma. Todas las piscifactorías estadounidenses se ubican dentro de la franja costera de 3 millas náuticas de ancho controlada por los estados, y solo algunos de ellos, como Hawai, las permiten. California aún ha de otorgar permisos, a pesar de que los cálculos gubernamentales indican que ceder a una industria acuícola sostenible menos del 1 por ciento de las aguas del estado podría generar unos beneficios de mil millones de dólares anuales.

MEDIDAS POLÍTICAS

Para crecer, y hacerlo de forma sostenible, la industria acuícola necesita políticas adecuadas y una regulación más justa. Actualmente, las flotas arrasteras se mantienen vivas gracias a importantes subvenciones estatales, a pesar de la bien conocida destrucción del fondo marino y del enorme volumen de descartes generados. Las subvenciones a los agricultores mantienen rentables las explotaciones de ganado vacuno, porcino y volatería. Y poderosos grupos de presión agrícola bloquean los intentos de reducir el arrastre y lavado de abonos nitrogenados hacia el río Mississippi. «Casi ninguno de los modos tradicionales de producción alimentaria se ha sometido al mismo escrutinio que la acuicultura», comenta Brooks. La opinión pública ha aceptado la domesticación de la tierra, pero considera el océano como un medio natural que no se debe alterar, aunque esa desigualdad no represente la mejor solución para alimentar al mundo.

Los cambios políticos en el ámbito federal y regional podrían abrir en breve las aguas estadounidenses a la acuicultura. En enero de 2009, el Consejo para la Gestión Pesquera del Golfo de México aprobó un plan sin precedentes para permitir la acuicultura oceánica dentro de su jurisdicción, pero este se halla todavía pendiente de aprobación por la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA). La NOAA evaluará el plan solo cuando finalice la redacción de su propia propuesta, que abordará todas las formas de la industria y probablemente incluirá directrices para el desarrollo de un marco legislativo homogéneo en todo el país. «No queremos que en la revolución azul se repitan los errores de la revolución verde», apunta Jane Lubchenco, directora de la NOAA.

Dado el incesante incremento de la demanda, la sociedad debe tomar decisiones difíciles sobre dónde potenciar la producción de proteínas. «Uno de mis objetivos ha consistido en fijarse en las pesquerías y la acuicultura, y no solo en los cereales y el ganado, cuando nos referimos a la seguridad alimentaria» comenta Lubchenco. Duarte sugiere rebajar la presión sobre la tierra y trasladarla al mar, donde tenemos la oportunidad de practicar una acuicultura sensata, en lugar lamentarnos por no haberlo hecho 40 años atrás.

PARA SABER MÁS

The state of world fisheries and aquaculture 2008. FAO, 2009.
Will the oceans help feed humanity? Carlos M. Duarte et al. en *BioScience*, vol. 59, n.º 11, págs. 967-976, diciembre de 2009.
Sustainability and global seafood. Martin D. Smith et al. en *Science*, vol. 327, págs. 784-786, 12 de febrero de 2010.
Will farmed fish feed the world? An analysis from the Worldwatch Institute. **www.worldwatch.org/node/5883**



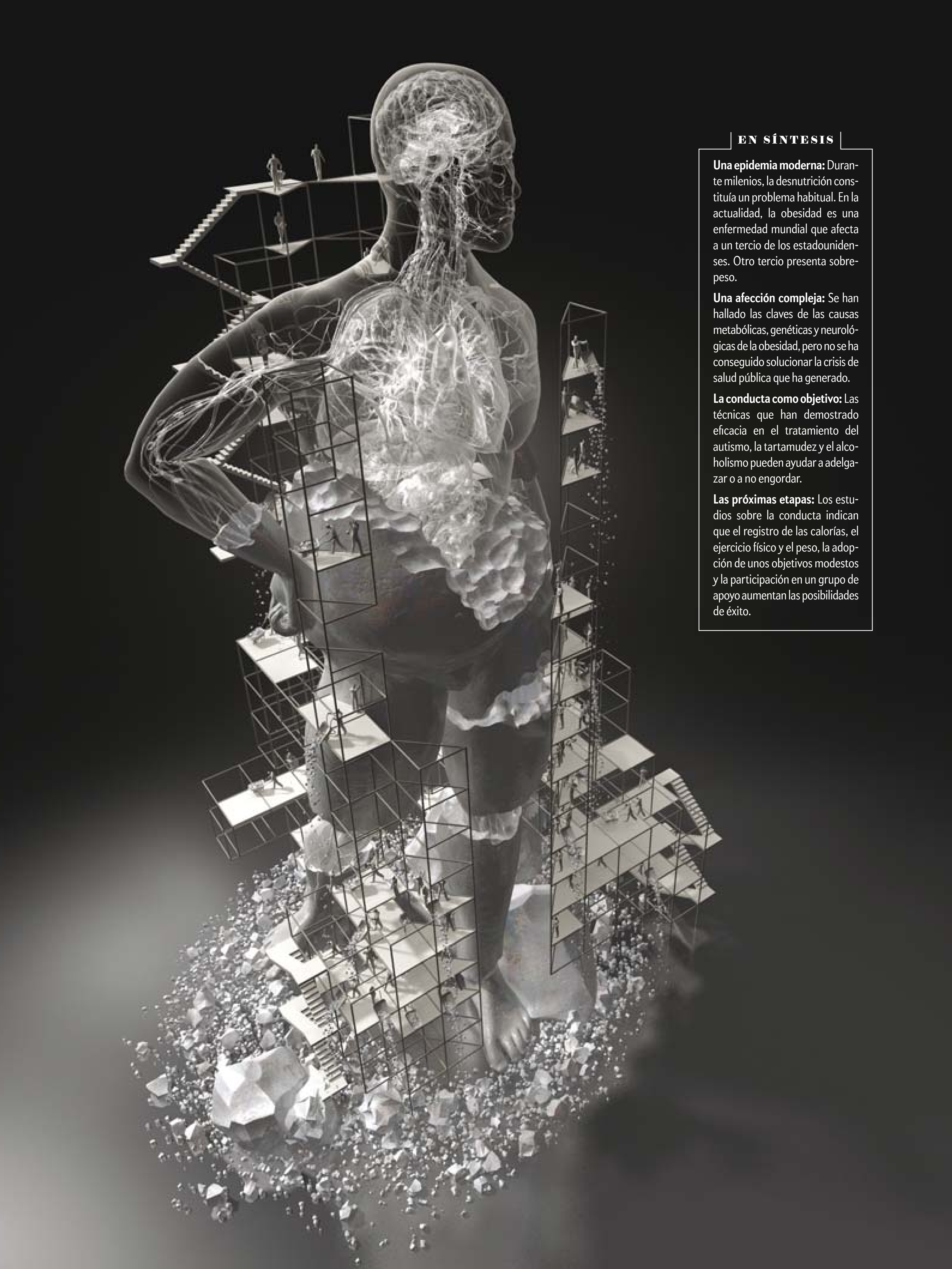
David H. Freedman escribe sobre ciencia, negocios y técnica desde hace 30 años.

SALUD

Combatir la obesidad

La ciencia ha ahondado en los procesos metabólicos que influyen en nuestro peso, pero la clave del éxito puede residir en otro lugar

David H. Freedman



EN SÍNTESIS

Una epidemia moderna: Durante milenios, la desnutrición constituía un problema habitual. En la actualidad, la obesidad es una enfermedad mundial que afecta a un tercio de los estadounidenses. Otro tercio presenta sobrepeso.

Una afección compleja: Se han hallado las claves de las causas metabólicas, genéticas y neurológicas de la obesidad, pero no se ha conseguido solucionar la crisis de salud pública que ha generado.

La conducta como objetivo: Las técnicas que han demostrado eficacia en el tratamiento del autismo, la tartamudez y el alcoholismo pueden ayudar a adelgazar o a no engordar.

Las próximas etapas: Los estudios sobre la conducta indican que el registro de las calorías, el ejercicio físico y el peso, la adopción de unos objetivos modestos y la participación en un grupo de apoyo aumentan las posibilidades de éxito.

La obesidad representa un grave problema de salud. Si se mantiene la tendencia actual, en EE.UU. pronto superará al tabaquismo como causa principal de muerte prematura, reducción de la calidad de vida y sobrecostes en la atención sanitaria. Un tercio de los adultos estadounidenses son obesos, según los datos de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), y otro tercio padece sobrepeso. La obesidad es responsable de más de 160.000 fallecimientos al año, según un estudio publicado en el *Journal of the American Medical Association*. Por término medio, una persona obesa le cuesta a la sociedad más de 7000 dólares al año, gasto derivado de la pérdida de productividad y del tratamiento médico, según investigadores de la Universidad George Washington. A lo largo de su vida, una persona con 32 kilos o más de sobrepeso ocasionará unos sobrecostes médicos de unos 30.000 dólares, dependiendo de la raza y el sexo.

¿Por qué resulta tan difícil deshacerse de los kilos que sobran y no recuperarlos? La fórmula básica para perder peso es sencilla y conocida por todos: consumir menos calorías que las que se gastan. Si fuera así de fácil, en EE.UU. la obesidad no constituiría el primer problema de salud relacionado con el estilo de vida. Para una especie que evolucionó hacia el consumo de alimentos muy energéticos en un entorno en que el hambre representaba una amenaza constante, hoy adelgazar y mantenerse esbelto supone una seria dificultad en un mundo abrumado por mensajes publicitarios y alimentos hipercalóricos sin valor nutritivo. Casi todos los que intentan seguir una dieta a la larga la abandonan. Una revisión de 31 estudios sobre dietas, llevada a cabo en 2007 por la Asociación Americana de Psicología, concluyó que al menos dos tercios de quienes habían seguido una dieta pesaban *más* que dos años atrás, antes de ponerse a régimen.

La ciencia ha utilizado sus mejores armas para resolver el problema. Los Institutos Nacionales de Salud (NIH) de EE.UU. han gastado unos 800 millones de dólares anuales en investigaciones sobre las bases metabólicas, genéticas y neurológicas de la obesidad. En el plan que han propuesto en 2011 para el estudio de la obesidad, incluyen líneas muy prometedoras: modelos animales para conocer las funciones proteicas en tejidos específicos; vías de señalización complejas en el cerebro y entre el cerebro y los demás órganos; identificación de las variantes genéticas relacionadas con la obesidad, y estudio de los mecanismos epigenéticos que regulan el metabolismo.

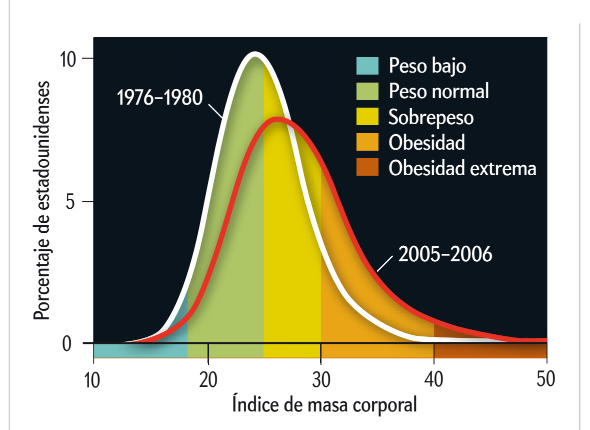
Las investigaciones han ofrecido datos importantes sobre el modo en que las proteínas interaccionan en nuestro organismo para extraer y distribuir la energía a partir de los alimentos y producir y almacenar grasa; la manera en que nuestro cerebro nos informa sobre la sensación de apetito; el motivo de que algunas personas presenten una tendencia congénita a la obesidad, y si la alimentación y la exposición a determinadas sustancias tóxicas pueden modificar y mitigar alguno de estos factores. Ese trabajo ha proporcionado a las compañías farmacéuticas una serie de objetivos potenciales para el desarrollo de medicamentos. Pero, desgraciadamente, no ha resuelto la epidemia.

Quizás algún día se invente una píldora que reajuste nuestro metabolismo para que queme más calorías o modifique nuestras preferencias alimentarias y elijamos así el brócoli antes que las hamburguesas. Pero hasta entonces, puede que el mejor enfoque consista en métodos fiables desarrollados por la psicología conductista hace 50 años y que han demostrado su eficacia en centenares de estudios. Estas técnicas, que han sido perfeccionadas gracias a nuevas investigaciones, suscitan una atención cada vez mayor. En su plan estratégico, los NIH remarcan que «las investigaciones están arrojando nuevas e importantes ideas acerca de los factores sociales y conductuales que influyen en la dieta, la actividad física y el sedentarismo.»

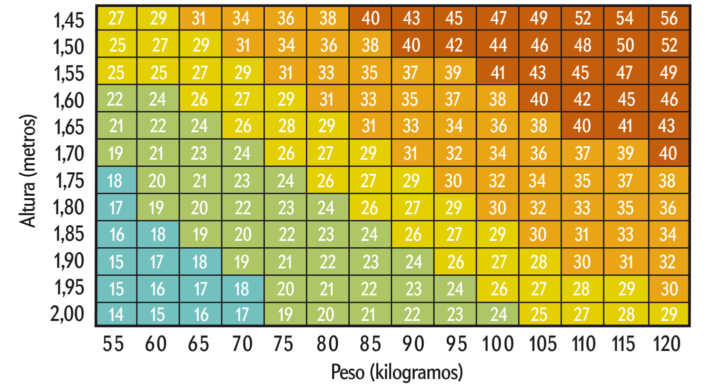
EPIDEMIA DE OBESIDAD

Una afección creciente

El aumento del sobrepeso y de la obesidad en EE.UU. (*izquierda*), medido a partir del índice de masa corporal (*derecha*), hace presagiar un incremento de los accidentes cerebrovasculares, enfermedades cardiovasculares, diabetes de tipo 2, ciertos tipos de cáncer y otros problemas crónicos de salud a lo largo del siglo XXI.



Peso en aumento: alrededor del 34 % de los estadounidenses adultos son obesos (*zona naranja*), valor superior al 15 % de finales de los setenta. Treinta y tres estados presentan un 25 % de obesos (no ilustrado).



Altura (metros) \ Peso (kilogramos)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
1,45	27	29	31	34	36	38	40	43	45	47	49	52	54	56
1,50	25	27	29	31	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52
1,55	25	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49
1,60	22	24	26	27	29	31	33	35	37	38	40	42	45	46
1,65	21	22	24	26	28	29	31	33	34	36	38	40	41	43
1,70	19	21	23	24	26	27	29	31	32	34	36	37	39	40
1,75	18	20	21	23	24	26	27	29	30	32	34	35	37	38
1,80	17	19	20	22	23	24	26	27	29	30	32	33	35	36
1,85	16	18	19	20	22	23	24	26	27	29	30	31	33	34
1,90	15	17	18	19	21	22	23	24	26	27	28	30	31	32
1,95	15	16	17	18	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30
2,00	14	15	16	17	19	20	21	22	23	24	25	27	28	29

El índice de masa corporal, o IMC (cociente entre el peso y la altura al cuadrado), fue desarrollado en el siglo XIX por el matemático y precursor de la sociología Adolphe Quetelet. Aunque el IMC no mide la grasa corporal, una cifra superior a 30 indica obesidad (excepto en los atletas muy musculosos).

BRYAN CHRISTIE (*página opuesta*); FUENTES: CENTROS PARA EL CONTROL Y LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES, CENTRO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS SANITARIAS Y SISTEMA NACIONAL DE SALUD Y NUTRICIÓN (*evolución del IMC*); INICIATIVA NACIONAL PARA LA EDUCACIÓN DE LA OBESIDAD (*tabla del IMC*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

EL ORIGEN DEL PROBLEMA

La desesperación de la persona obesa o con sobrepeso se refleja en la inmensa información que se genera diariamente a través de diversos medios, como revistas científicas, libros de éxito, periódicos y bitácoras. Nuestro afán por cualquier cambio o truco en la dieta que elimine con rapidez y para bien los kilos de más parece tan insaciable como el apetito que nos hace engordar. Nos gusta creer en remedios milagrosos, lo que lleva a los medios de comunicación a publicar en cada nuevo titular los últimos descubrimientos, como si estos ofrecieran la solución definitiva.

No ayuda el hecho de que los hallazgos informados en esos titulares parezcan a veces contradictorios. En el *American Journal of Clinical Nutrition* del pasado septiembre se demostró en un estudio la relación entre el incremento del consumo de leche y la pérdida de peso, aunque un metanálisis publicado en mayo de 2008 en *Nutrition Reviews* no descubrió tal concordancia. En un artículo del *Journal of Occupational and Environmental Medicine* de enero de 2010 se proponía una asociación entre el estrés laboral y la obesidad, pero en octubre, un informe publicado en la revista *Obesity* concluía que esta relación no existía. Parte del problema estriba en que los investigadores de la obesidad son, en sentido metafórico, como los ciegos del cuento, que palpan a tientas diferentes partes de un elefante. Las conclusiones de sus estudios individuales abarcan tan solo pequeñas piezas de un complejo rompecabezas.

Cuando se observa el conjunto de los datos, resulta evidente que la solución de la obesidad no radica tan solo en comer este o aquel alimento, o llevar a cabo una u otra acción. Numerosos factores contribuyen a la enfermedad. Por una parte, el entorno: los hábitos alimentarios de los amigos, los alimentos disponibles en el hogar y en los comercios locales, y la posibilidad de desplazarse durante el trabajo. Existe asimismo una predisposición genética a almacenar grasa, a presentar un umbral elevado de saciedad e incluso a poseer un mayor número de papilas gustativas. Y no hay que olvidar los factores económicos: la comida basura es mucho más barata que los productos frescos. Ni tampoco el *marketing*: las compañías de alimentación han logrado influir en la naturaleza social humana y en nuestra «programación» evolutiva para guiarnos hacia metas no saludables pero rentables. Ello explica que las escuetas medidas del tipo «Coma esto», igual que la mayoría de las soluciones simples, no funcionen.

Cuando seguimos una dieta o un programa de ejercicios para adelgazar, confiamos en nuestra fuerza de voluntad para vencer la tentación de comer más de lo que necesitamos. La recompensa de lograr un cuerpo más delgado y sano nos ayuda a mantener nuestro propósito. Es gratificante perder peso, por supuesto, pero el tiempo juega en contra nuestra. A medida que adelgazamos, nuestro apetito va creciendo, nos volvemos más ansiosos y nos cuesta más hacer ejercicio. Mientras tanto, la pérdida de peso se enlentece, al tiempo que nuestro metabolismo intenta compensar esta privación gastan-

AVANCES

Biología de la obesidad

Los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. han gastado cerca de 800 millones de dólares en un año para investigar los fundamentos neurológicos, metabólicos y genéticos de la obesidad. Gracias a esos estudios se han descubierto vías bioquímicas y circuitos de retroalimentación complejos que conectan el cerebro con el aparato digestivo, aspectos nuevos de las funciones reguladoras de los tejidos grasos, cambios hereditarios sutiles que hacen que unas personas sean más propensas que otras a la obesidad y la posibilidad, muy verosímil, de que la exposición a determinados alimentos y sustancias tóxicas modifique y mitigue alguno de estos factores. Dado que llevará decenios comprender las causas diversas de la obesidad, sin duda nos esperan descubrimientos sorprendentes.

Cerebro: se sabe desde hace tiempo que el hipotálamo y el tronco encefálico ayudan a regular las sensaciones de hambre y saciedad. Durante los últimos años, se ha comprobado que los centros del placer y recompensa del sistema límbico y las funciones de evaluación de la corteza prefrontal se hallan también muy implicados. De hecho, la sobrealimentación crónica presenta similitudes bioquímicas con la drogadicción.

Metabolismo: la capacidad de quemar y almacenar energía varía mucho de una célula a otra. En 2009, tres estudios publicados en el *New England Journal of Medicine* demostraron que algunas personas continúan presentando en la edad adulta pequeños depósitos de grasa parda que, a diferencia de la grasa blanca, se asocia a la delgadez. La grasa parda ayuda a producir calor y, aparentemente, está más relacionada con el músculo que con la grasa blanca, cuya finalidad principal es almacenar el exceso de energía.

Genes: se han confirmado variaciones en 20 genes únicos que predisponen a ganar peso. Sin embargo, una investigación posterior ha demostrado que ejercen un efecto reducido y no pueden explicar la actual epidemia de obesidad. Por otra parte, los genes todavía pueden desempeñar una función importante según si son activados o no por el entorno. Hasta ahora, la mayor parte de esos interruptores genéticos de la obesidad se han identificado en ratones, aunque se sabe de algunos que podrían funcionar en humanos.

PHOTO RESEARCHERS, INC. (*IRM*); PETER Y MARIA HOEY (*ilustración*)

do menos calorías. El sacrificio por mantener nuestro régimen se hace cada vez más difícil y la esperanza de una recompensa se desvanece. «Al cabo de unos meses, el distanciamiento entre la compensación de comer y la eventual gratificación de perder peso plantea una enorme amenaza», afirma Sung Woo Kahng, neuróloga de la conducta que investiga la obesidad en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins y en el Instituto Kennedy Krieger.

Probablemente seguiríamos con el régimen si este conllevara un menor sacrificio y una mayor recompensa. ¿Existe alguna manera de conseguirlo?

DE LA BIOLOGÍA AL CEREBRO

Hasta el momento, el modo más eficaz de perder peso, aunque sea poco, y de evitar recuperarlo consiste en asociar la dieta y el ejercicio físico a la modificación de la conducta. El enfoque conductista, verificado durante decenios, se basa en realizar cambios pequeños y constantes en los hábitos de alimentación y de ejercicio físico que son fomentados por las personas que nos rodean y el resto de nuestro entorno.

Las investigaciones sobre la modificación de la conducta para adelgazar ocuparon más de medio siglo al psicólogo de la Universidad de Harvard B. F. Skinner, quien desarrolló la ciencia del análisis de la conducta. Ese campo se basa en la idea de que no se puede conocer lo que sucede en el cerebro humano. (La resonancia magnética funcional, técnica que permite observar las interconexiones mentales, apenas logra representaciones burdas y de interpretación muy variable sobre la cognición y la emoción.) Sí se puede en cambio observar y medir de forma objetiva y repetible la conducta física y el entorno inmediato donde

¿CÓMO ADELGAZAR?

Cuatro pasos para perder peso

Los estudios sobre la obesidad y las dietas que se basan en la conducta han identificado algunas condiciones básicas que parecen aumentar la probabilidad de perder peso y mantenerlo, entre ellos marcarse objetivos claros y modestos, y centrarse en los hábitos de vida. La mayoría de esos cambios conductuales se incluyen en cuatro categorías.

Asesoramiento inicial
La investigación subraya la necesidad de determinar las medidas básicas. ¿Cuál es el peso adecuado? ¿Qué rituales y rutinas contribuyen al exceso de alimentación (comer en situaciones de estrés) o a la inactividad física (expectativas poco realistas)? Un médico, una enfermera o un nutricionista pueden ayudar en este asesoramiento.

Cambios de comportamiento
A muchas personas les resulta más fácil empezar por pequeños cambios, como subir por la escalera en vez de coger el ascensor. Diferentes estudios han demostrado que ver el bufet completo antes de servirse ayuda a ponerse en el plato menos comida.

Autocontrol
Registrar el peso, contar las calorías consumidas y las distancias recorridas proporcionan una información objetiva sobre la mejora de los hábitos. Los estudios sobre la conducta han hallado igualmente eficaces los registros en papel y los sistemas de control.

Grupos de ayuda
Las investigaciones subrayan los efectos benéficos del apoyo de otras personas. Un grupo para hacer ejercicio, un grupo clásico de apoyo o incluso un grupo virtual permiten a sus integrantes compartir los éxitos, lamentar reveses y planificar soluciones.

PETER Y MARIA HOEY

Una jungla urbana más saludable

La ciudad de Nueva York aplica medidas políticas y económicas para mejorar su «entorno alimentario»

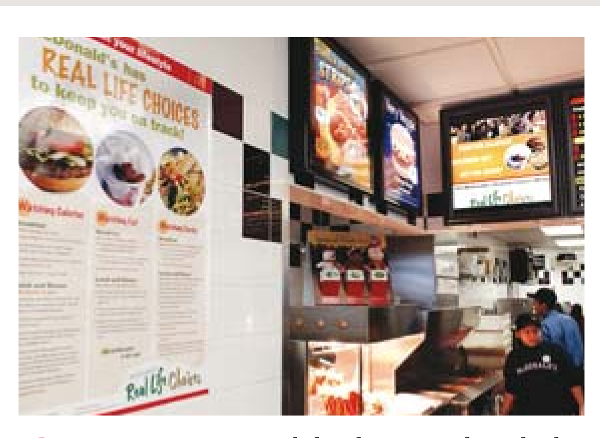
THOMAS FARLEY

Numerosas investigaciones buscan en el interior de nuestras células la solución a la obesidad. Sin embargo, las claves de esta epidemia no residen en el mundo microscópico de la genética y la fisiología, sino en el macroscópico de la sociología y la economía. En Nueva York, donde residen millones de personas con sobrepeso o camino de tenerlo, se están desarrollando varios programas con el propósito de crear un entorno alimentario más sano.

La comida se halla por doquier, es barata, calórica y se nos sirve en porciones de un tamaño por encima de nuestras necesidades. Resulta difícil imaginar un edificio sin una máquina expendedora de refrescos o una esquina sin un establecimiento de comida rápida. En las tiendas del sur del Bronx, los artículos más destacados son botellas de refrescos de tres litros y enormes bolsas de papas.

La ciudad está intentando cambiar el entorno alimentario promoviendo el consumo de una serie de productos más sanos en porciones de menor tamaño. A los participantes en el Programa de Asistencia de Nutrición Suplementaria (SNAP), se les ofrecen vales de dos dólares para utilizar en los mercados de agricultores, como un estímulo para comprar frutas y verduras frescas con pocas calorías. Se anima a los comerciantes a que adquieran alimentos menos calóricos, y se han introducido incentivos urbanísticos y económicos para que se abran supermercados en barrios donde solo había pequeñas tiendas de comestibles. Se ha mejorado la calidad de los productos vendidos en las cafeterías escolares, con la eliminación de las bebidas ricas en calorías de las máquinas expendedoras. Se han establecido estándares nutricionales para los alimentos que se venden o distribuyen en las agencias municipales, que reparten un total de 225 millones de comidas al año.

En 2008, la ciudad comenzó a pedir a las cadenas de restaurantes que indicaran el número de calorías en las cartas y menús. El efecto ha sido modesto: alrededor de un 25 por ciento de los comensales utiliza el valor calórico para decidir lo que va a consumir, lo que le supone reducir unas 100 calorías por comida. El mejor resultado de esta medida ha sido que los restaurantes, avergonzados por presentar un sándwich con más de 1000 calorías, disminuyen el tamaño de sus raciones.



Elección: Un 25 por ciento de los clientes que leen el valor calórico de los platos en la carta utilizan esa información para ingerir unas 100 calorías menos por comida.

Cualquier esfuerzo dirigido a crear un entorno alimentario más sano no debe olvidar las bebidas azucaradas, responsables de entre un tercio y la mitad de las 300 calorías en que se ha incrementado la dieta diaria de los estadounidenses en los últimos treinta años. Esas bebidas se han relacionado con la obesidad o la ganancia de peso, según se ha demostrado en estudios observacionales y ensayos clínicos aleatorizados. La ciudad de Nueva York ha apoyado una legislación estatal que introduciría un impuesto especial en las bebidas azucaradas para compensar los incentivos en las raciones grandes. Los modelos económicos sugieren que un aumento de un diez por ciento en el precio reduciría la venta de estas bebidas en un ocho por ciento.

El pasado otoño la ciudad presentó un proyecto demostrativo sobre las repercusiones de eliminar el subsidio de los productos azucarados en el programa SNAP. La medida resolvería una contradicción básica dentro de las políticas públicas. Cuando se plantea a los neoyorquinos que las bebidas azucaradas producen obesidad y diabetes, ¿cómo se justifica la distribución de vales para adquirir gratis esos productos, especialmente cuando forman parte de un programa de nutrición? Además, esa propuesta podría modificar los hábitos del mercado. Si las tiendas de comestibles dejan de vender refrescos hipercalóricos de tres litros, quizá favorezcan la venta de otros productos más saludables aceptados por el programa.

Las encuestas demuestran que los adultos han reducido el consumo de bebidas azucaradas desde 2007. Se hizo también un seguimiento del peso y la altura de los encuestados, y se supervisó estrechamente la salud y el índice de masa corporal de los 1.200.000 estudiantes de las escuelas públicas de la ciudad. Todavía es pronto para saber si los cambios logrados han ejercido un efecto sobre los porcentajes de obesidad. Llevamos más de treinta años con esta epidemia e invertirla costará tiempo, pero creemos haber hallado el camino correcto. A menos que nuestra visión de futuro contemple que la mayoría de los estadounidenses tomen una pastilla diaria contra la obesidad, deberemos modificar nuestro entorno, no nuestra fisiología.

Thomas Farley es el Comisionado de Salud de la ciudad de Nueva York.

esta se produce, lo que permite identificar las conexiones entre el ambiente y el comportamiento. Se pueden detectar así los sucesos o situaciones que desencadenan determinados comportamientos y diferenciar si son gratificantes, con lo que reforzarán ciertas conductas, o de castigo, con lo que inhibirán otras.

La eficacia de las intervenciones sobre el comportamiento está ampliamente documentada en una gran variedad de alteraciones y trastornos conductuales. En 2009, un metanálisis publicado en el *Journal of Clinical Child and Adolescent Psychology* recomendaba «una intervención temprana e intensiva sobre la conducta en niños autistas». Una revisión sistemática financiada por el Grupo de Trabajo de Servicios Preventivos de EE.UU. descubrió que incluso las pequeñas intervenciones de asesoramiento para alcohólicos reducían entre un 13 y un 34 por ciento

STEPHEN CHERNIN *Getty Images*

el número de tomas durante cuatro años. Varios estudios de revisión han descrito un éxito similar de esos métodos en campos tan diversos como la disminución del tartamudeo, el aumento del rendimiento deportivo y la mejora de la productividad laboral.

Para luchar contra la obesidad, los analistas de la conducta examinan los factores del entorno relacionados con la enfermedad: ¿Qué factores externos inducen a comer en exceso o consumir comida basura y cuáles llevan a una alimentación sana? ¿En qué situaciones las conductas y los comentarios de los demás influyen en una mala alimentación? ¿Qué aspectos gratificantes conlleva una nutrición adecuada a largo plazo? ¿Qué recompensas puede aportar el ejercicio físico? Ya en la década de los sesenta, las investigaciones sobre la obesidad y las dietas centradas en la conducta reconocieron algunas actitudes básicas que parecían favorecer la pérdida y mantenimiento del peso: medir y anotar escrupulosamente las calorías, hacer ejercicio y pesarse; conseguir cambios modestos y graduales, en vez de grandes cambios; seguir una dieta equilibrada con algo de grasa y azúcar, en lugar de eliminar los principales alimentos; marcarse objetivos claros y modestos; centrarse en hábitos de vida a largo plazo, en vez de regímenes rápidos, y, sobre todo, acudir a grupos en que las personas reciban ánimos y refuerzos para mantener la dieta.

Vivimos rodeados de complejas estrategias publicitarias que sacan provecho de nuestra necesidad de satisfacer los sentidos y de nuestra vulnerabilidad ante la desinformación

El que hoy en día esas estrategias suenen a consejos de sentido común se debe a la popularización, desde hace casi medio siglo, de la Dieta de los Puntos, de la sociedad Vigilantes del Peso (Weight Watchers). Fundada en 1963 para crear grupos de apoyo para personas sometidas a régimen, introdujo otras formas de asesoramiento descritas en estudios sobre la conducta. «Independientemente de cómo se pierda peso, el secreto reside siempre en el cambio de hábitos», ha declarado Karen Millar-Kovach, investigadora en nutrición y directora científica de la compañía. Es una destreza que se puede aprender.

Varias investigaciones respaldan el enfoque conductista para adelgazar. En 2003, una revisión llevada a cabo por el Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. concluyó que el asesoramiento y las intervenciones sobre la conducta contribuían a una pérdida de peso entre pequeña y moderada que se mantenía al menos durante un año —un período de tiempo notable en este contexto—. Un análisis de los ocho programas de adelgazamiento más populares, publicado en 2005 en la revista *Annals of Internal Medicine*, demostró que la Dieta de los Puntos (en ese momento en su versión previa a la revisión de 2010) era el único método eficaz que conseguía mantener una pérdida de peso del 3 por ciento durante los dos años de seguimiento. Mientras, un estudio publicado en *JAMA* en 2005 reveló que, entre varias dietas muy populares, la de los Puntos y la de la Zona (que, al igual que aquella, recomienda una ingesta equilibrada de proteínas, hidratos de carbono y grasas), conseguían el cumplimiento más alto (un 65 por ciento) durante un año; asimismo, demostró que el nivel de cumplimiento, y no el tipo de dieta, constituía la clave del éxito clínico. Un artículo del *Journal of Pediatrics* describió en 2010 que, al cabo de un año, los niños que recibían una terapia conductual conseguían un índice de masa corporal entre un 1,9 y un 3,3 inferior al de los que no la recibían. (El índice de masa corporal es el cociente entre el peso y la altura al cuadrado. Un valor igual o menor que 18,5 indica un peso inferior al normal; un valor igual o superior a 25, sobrepeso.) El artículo señalaba que había pruebas, si bien menos concluyentes, de que las mejoras se mantenían hasta doce meses después de finalizar el tratamiento. Otro artículo publicado en 2010 en la revista *Obesity* demostró que los miembros de Adelgazar con sensatez (TOPS, de Take Off Pounds Sensibly), una organización estadounidense sin ánimo de lucro que se centra en métodos conductistas para adelgazar, consiguieron entre un 5 y un 7 por ciento de pérdida de peso durante los tres años de la investigación. El Consejo de Investigación Médica del Reino Unido hizo público el pasado año un estudio a largo plazo que revelaba la mayor eficacia de los programas de adelgazamiento basados en principios conductistas, en comparación con otros tratamientos. (El estudio fue financiado por Weight Watchers, pero sin su participación.)

No obstante, la Dieta de Puntos y otros programas del mercado de masas tienden a quedarse cortos en el número de técnicas conductuales que incluyen y su adaptación a las necesidades individuales. No pueden proporcionar consejos personalizados, adaptar el asesoramiento a problemas concretos o evaluar los factores ambientales de la vivienda, el lugar de trabajo o la comunidad. Tampoco pueden brindar ayuda a los miembros que no acuden a las reuniones o que adelgazan de forma drástica y poco duradera o limitan la ingesta de ciertos grupos de alimentos. Incluso Weight Watchers, como empresa que busca beneficios, introduce a veces esas ideas contraproducentes en su publicidad. «Algunos acuden a nosotros para perder cinco kilos porque han de asistir a una fiesta de antiguos compañeros de instituto», afirma Miller-Kovach, de Weight Watchers. «Consiguen su objetivo y dejan de venir».

Para resolver esas deficiencias, en los últimos años varios investigadores se han esforzado en mejorar, extender y adaptar las técnicas conductistas con resultados esperanzadores. Michael Cameron, jefe del departamento de análisis del comportamiento del Simmons College y miembro de la facultad de medicina de Harvard, centra sus investigaciones en las técnicas conductistas para perder peso. Desde hace un año realiza un estudio en cuatro personas (los analistas de la conducta suelen llevar a cabo estudios en grupos muy reducidos, o incluso en una sola persona, con el fin de adaptar mejor la intervención y observar los efectos individuales), que se reúnen con él a través de videoconferencia para recibir apoyo, utilizan balanzas que transmiten datos por vía inalámbrica y siguen dietas menos calóricas pero adaptadas a sus gustos alimentarios. Los alimentos preferidos se utilizan para recompensar el esfuerzo del ejercicio físico. Hasta ahora los participantes han perdido entre un 8 y un 20 por ciento de su peso corporal.

Matt Normand, analista del comportamiento de la Universidad del Pacífico de EE.UU., ha intentado hallar una manera más precisa de controlar la ingesta y el gasto calórico de las personas. Ha propuesto la recogida de los recibos de las compras de alimentos, la distribución de listas de control donde anotar los alimentos ingeridos y el suministro de podómetros y otros dispositivos para medir la actividad física; con esos datos, proporciona a los participantes un registro diario detallado del balance calórico. En un trabajo ha demostrado que tres de los cua-

La infancia, etapa crítica

Varios programas fomentan estilos de vida saludables para frenar la obesidad infantil y evitar que la epidemia se propague en la edad adulta

ROSAURA LEIS Y RAFAEL TOJO

La obesidad afecta a todos los países y a todas las edades. En 1997, la Organización Mundial de la Salud (OMS) la declaró por ello el nuevo síndrome mundial, una epidemia global. En la actualidad, constituye la enfermedad crónica no transmisible y el desorden nutricional y metabólico más prevalente en el mundo.

La epidemia comienza su aparición cada vez a edades más tempranas, siendo crítico el período de dos a cinco años. La tasa de su incremento es mayor en niños que en adultos. El informe del Grupo de Trabajo Internacional contra la Obesidad (IOTF, de International Obesity Task Force) estima que, en Europa, uno de cada cinco niños sufre sobrepeso u obesidad.

En España, según los estudios Paidos (1984), que valora el pliegue graso subcutáneo tricipital, y enKid (2000), que valora el índice de masa corporal (IMC) en la población infantil y juvenil, se ha triplicado la prevalencia de la obesidad en niños escolares: ha pasado del 4,9 al 13,9 por ciento. En la última Encuesta Nacional de Salud del Ministerio de Sanidad y Consumo (2006), que recoge información suministrada por los padres, la prevalencia del sobrepeso y obesidad en los niños y adolescentes de entre 2 y 17 años es del 27,6 por ciento; la de la obesidad, del 8,9 por ciento. En el reciente informe Thao Salud Infantil (2011), elaborado a partir de datos de 26.251 niños tomados durante el curso escolar 2009/2010, y en referencia a los valores de la IOTF, que sobrestiman el sobrepeso e infravaloran la obesidad, casi uno de cada tres niños (29,3 por ciento) de entre 3 y 12 años sufre exceso de peso (sobrepeso u obesidad). El 8,4 por ciento de los niños de 3 a 5 años presenta obesidad. (Cabe remarcar que las cifras de prevalencia varían de un estudio a otro, según los puntos de corte utilizados para definir el sobrepeso y la obesidad.)

En Galicia, hemos llevado a cabo un estudio transversal de los estilos de vida (alimentación, actividad física e inactividad), antropometría y factores de riesgo cardiovascular con un grupo de más de 18.000 niños desde 1979 hasta la actualidad: el estudio GALINUT. Respecto de los datos de 1991 (obtenidos a partir de una muestra de 8144 niños y adolescentes gallegos), en 2001 el exceso de peso se había duplicado (31 %), la obesidad triplicado (15,3 %) y la obesidad mórbida multiplicado por seis (6,1 %).

El estudio ha detectado también un incremento notable y progresivo del IMC, sobre todo a partir del percentil 75. Asimismo, ha aumentado la circunferencia de cintura (CC), parámetro que guarda una estrecha relación con el acúmulo de grasa visceral y las comorbilidades asociadas a la obesidad. Entre 1991 y 2001, la CC pasó en los niños de 10 años de 64,1 a 68,3 centímetros; en las niñas, de 51,9 a 57,5 centímetros. Nos hallamos, pues, ante un gran aumento de la población infantil con IMC y CC elevados.

La evolución del aumento del sobrepeso y la obesidad en España en las últimas décadas se debe en gran parte a los cambios en los estilos de vida relacionados sobre todo con la alimentación (mayor consumo de alimentos muy calóricos pero de escaso valor nutricional), la disminución de la actividad física y el aumento del sedentarismo, ligado al ocio pasivo (televisión, videojuegos, etcétera) y a los desplazamientos en vehículos.

Cuando esa generación de niños y adolescentes obesos sea adulta, un número importante de ellos seguirán siendo obesos, lo que conllevará efectos potencialmente devastadores sobre su salud. En los que superen la obesidad, el daño generado por la enfermedad durante la infancia puede perdurar. Ha llegado, por tanto, el momento de actuar.

En 2004, la OMS estableció la estrategia mundial para la prevención de la obesidad, basada en la promoción de cambios en los hábitos de consumo alimentario y de actividad física. Recomienda la participación de todos los agentes sociales, el enfermo (niño, adolescente o adulto), la familia, la escuela, la industria (sobre todo las de alimentación, moda, comunicación y publicidad), los ayuntamientos, las instituciones públicas y privadas, ONG y los gobiernos.

En España, el Ministerio de Sanidad y Consumo, a través de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición inició en 2005 la Estrategia para la Nutrición, Actividad Física y Prevención de la Obesidad (NAOS, www.naos.aesan.msps.es). La campaña nació con el propósito de sensibilizar a la población acerca del problema que la obesidad representa para la salud y de impulsar la adopción de hábitos de vida saludables, sobre todo en niños y jóvenes (***ilustración***). Sirve de paraguas para otras estrategias de prevención e intervención, como el Programa piloto escolar de referencia para la salud y el ejercicio (PERSEO, www.perseo.aesan.msps.es), en el ámbito escolar, el Programa gallego de actividades saludables, ejercicio y alimentación (PASEA), a escala autonómica, o el Programa Thao-Salud Infantil (www.thaoweb.com), de aplicación en municipios.

Rosaura Leis y Rafael Tojo
Unidad de investigación en nutrición y desarrollo humano de Galicia
Hospital Clínico Universitario de Santiago
Universidad de Santiago de Compostela

PROYECTO *ESTRATEGIA NAOS* DE LA AGENCIA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y NUTRICIÓN

tro participantes redujeron la ingesta de calorías a los niveles recomendados. Richard Fleming, del Centro Shriver de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts, ha examinado en *Obesity* varias formas en que los padres pueden orientar a sus hijos para que escojan las opciones más saludables. Entre otras medidas, ha descubierto que resulta útil enseñar a los padres el espacio que ocupan en los platos las raciones apropiadas de comida. Otro truco exitoso de Fleming: dejar que los niños elijan un pequeño premio en una tienda de alimentos siempre y cuando caminen hasta allí.

¿Por qué son eficaces las intervenciones sobre el comportamiento? Laurette Dubé, experta en psicología del estilo de vida y en publicidad, de la Universidad McGill, señala que, en nuestro entorno, las complejas estrategias publicitarias que se hallan por doquier sacan provecho de nuestra necesidad de satisfacer los sentidos y de nuestra vulnerabilidad ante la desinformación. Además, los malos hábitos de alimentación y de actividad física que observamos en nuestros amigos, familiares y colegas nos inclinan a seguir su ejemplo. En esencia, las actuaciones sobre la conducta buscan reconfigurar este entorno y crear uno nuevo donde nuestras necesidades de información, gratificación y estímulo social nos lleven a elegir una comida sana y realizar ejercicio. «Cuando recibimos mensajes adecuados por distintas vías, podemos controlar mejor la propensión a comer en exceso», declara Dubé.

CAMBIO DE POLÍTICA

No existe una solución universal, sea conductual o de otro tipo, frente a la obesidad. Aunque las intervenciones sobre la conducta funcionan mejor cuando se adaptan a cada individuo, los métodos conductistas a gran escala, como la Dieta de los Puntos o TOPS, demuestran cierta eficacia. ¿Por qué no adelgaza más gente con ellos? La razón principal estriba, simplemente, en que las personas no se inscriben en ellos; a veces, porque adoptan las dietas o los suplementos de moda, o porque han leído que la obesidad está inscrita en nuestros genes. La Dieta de los Puntos, con mucho el más popular de los programas, cuenta con 600.000 participantes en sus reuniones de Norteamérica. Es decir, menos de un uno por ciento de los obesos estadounidenses y casi una de cada doscientas personas con sobrepeso forman parte de un programa reglado de modificación de la conducta.

Sin embargo, las políticas públicas podrían estar cambiando. La Oficina del Cirujano General de EE.UU. y los CDC han apoyado el enfoque conductista como instrumento principal para combatir la obesidad. La campaña contra la obesidad infantil «¡Muévete!», de la Primera Dama Michelle Obama, se basa casi por completo en esa estrategia: busca la manera de animar a los niños a que consuman alimentos bajos en calorías, realicen más actividad física y disfruten con ello. La reciente prohibición en San Francisco de incluir juguetes en el menú infantil *Happy Meals* hace pensar que existe una mayor presión pública para que la industria alimentaria modere las estrategias publicitarias que en última instancia favorecen la obesidad. Para promover la compra de comida sana en comunidades pobres con mucho sobrepeso, la Casa Blanca ha propuesto sufragar los costes de la fruta y la verdura. El alcalde de Nueva York, Michael Bloomberg, ha abordado el problema desde otro ángulo: ha propuesto modificar los programas de ayuda alimentaria con el fin de reducir la compra de bebidas azucaradas. Y el año pasado, Washington D.C. aprobó un impuesto del 6 por ciento en esas bebidas. Asimismo, la ciudad de Nueva York ha ofrecido a las familias con bajos ingresos vales para comprar productos en los mercados de agricultores y ha dado incentivos a los comercios que venden comida saludable.

Algunos expertos están intentando que el gobierno vuelva a redactar la reglamentación urbana y de edificación para que los barrios y los edificios sean más aptos para pasear, ir en bicicleta y subir escaleras. Un estudio realizado en 2009 por investigadores de la facultad de medicina de la Universidad estatal de Louisiana reveló que aumentar el uso de las escaleras apenas un 2,8 por ciento hace perder casi medio kilo al año a una persona. «La correlación entre la actividad física y un peso corporal adecuado es una de las mejor demostradas en los estudios sobre obesidad», declara William M. Hartman, psicólogo y director del Programa de control del peso del Centro Médico del Pacífico de California, en San Francisco.

Ayudaría también un mayor acceso a las terapias conductuales. Muchas personas con sobrepeso necesitan tan solo una supervisión conductual en línea, apoyo y herramientas para informar el progreso realizado, todo lo cual ha demostrado una moderada eficacia en diversos estudios. Otras personas precisan intervenciones más intensas y personales, como las desarrolladas por Cameron. Dado que la obesidad afecta sobre todo a los más desfavorecidos económicamente, estos programas deberían ser sufragados por el gobierno y las compañías de seguros sanitarios. Si se considera que una sesión semanal con un terapeuta conductista cuesta unos 50 dólares, la financiación ascendería a unos 2500 dólares al año, lo que representa poco más de la tercera parte de los 7000 dólares anuales de los gastos sociales y médicos que genera la obesidad. Además, puede que las sesiones se necesiten solo durante uno o dos años, tiempo que bastaría para establecer unos hábitos sanos de alimentación y ejercicio físico, mientras que el ahorro continuará toda la vida.

Todavía es pronto para saber si la población aceptará los esfuerzos del gobierno para que adopte un estilo de vida sano. En San Francisco, una comunidad especialmente receptiva a las iniciativas de salud pública, el proyecto que prohibió los *Happy Meals* ha provocado airadas protestas y el alcalde Gavin Newson lo ha vetado. La iniciativa «¡Muévete!» para llevar comida sana a las cafeterías escolares ha sido fuertemente criticada por algunos, por considerarla una intromisión excesiva. Incluso si esos esfuerzos se aplicaran en todo el país, no es posible asegurar que la obesidad se redujera de forma significativa. Nunca se había alcanzado en el planeta una tasa de obesidad como la actual, por lo que una solución a gran escala significaría un experimento sobre el cambio de conducta de masas. No obstante, los datos sugieren que tal experimento nos ofrecería la mejor oportunidad para resolver el problema, razón por la cual se albergan esperanzas sobre su éxito. Debido a que cada vez más científicos, expertos en políticas públicas y funcionarios muestran afán por erradicar la obesidad, puede que se obtengan los primeros resultados en el presente decenio.

PARA SABER MÁS

About behaviorism. B. F. Skinner. Vintage, 1974.

You on a diet: the owner's manual for waist management. Michael F. Roizen y Mehmet C. Oz. Free Press, 2006.

Determining the Effectiveness of Take off Pounds Sensibly (TOPS), a nationally available nonprofit weight loss program. Nia S. Mitchell et al. en *Obesity*. Publicado en línea el 23 de septiembre de 2010. www.nature.com/oby/journal/vaop/ncurrent/full/oby2010202a.html

Portal sobre las investigaciones de los NIH (National Institutes of Health): **obesityresearch.nih.gov**



Jan Assmann es profesor emérito de la Universidad de Heidelberg, donde impartió clases entre 1976 y 2003. Desde 2005 es profesor honorario de antropología cultural y teoría de las religiones en la Universidad de Constanza.

ANTROPOLOGÍA

Las dos caras del tiempo

En el antiguo Egipto no se percibía el tiempo como una magnitud ordenada que transcurría hacia el futuro, sino como un fenómeno dotado de dos aspectos: la repetición cíclica y la duración eterna

Jan Assmann



Monumentos para la eternidad: Los antiguos egipcios concebían el tiempo como la unión de dos aspectos, lo cíclico y lo eterno, facetas que permeaban la cultura, la religión y la moral. La construcción de grandes monumentos de piedra era la manifestación de la *djet*, el tiempo eterno de duración inmutable.

ANDRE KLASSEN/FOTOLIA

EN SÍNTESIS

La percepción del tiempo en el antiguo Egipto se basaba en una división entre el *neheh* (lo cíclico) y la *djet* (lo eterno). Solo la unión de ambos engendraba el tiempo en su totalidad.

Esta concepción dual se plasmaba en el lenguaje, la cultura, la religión y la moral. El *neheh* era el tiempo de Ra, la divinidad solar; la *djet* se asociaba a Osiris, el dios de los muertos.

Los ritos periódicos servían al mantenimiento del *neheh*. Con la construcción de grandes monumentos de piedra, concebidos para la posteridad, se honraba a la *djet*.

El hoy pertenecerá mañana al pasado. Ya en el siglo V a.C., Heráclito formuló lo siguiente: «En el mismo río entramos, pero no es siempre el mismo». Lo transitorio engendra tiempo, el cual exhibe una dirección. En vista de que podemos rememorar lo que ha ocurrido pero no lo que acontecerá, y dado que cada fenómeno aparece como consecuencia de alguna causa anterior, dividimos el tiempo en pasado, presente y futuro. Dicha clasificación queda patente en el sistema verbal de la mayoría de las lenguas indoeuropeas. Nos resulta tan obvia que la consideramos universal.

Otras culturas, sin embargo, percibían el tiempo de manera diferente. Entre ellas se encontraba la de los antiguos egipcios. Al igual que nuestras lenguas reflejan la tríada formada por el pasado, el presente y el futuro, en el antiguo Egipto la concepción del tiempo se dividía en el *neheh* y la *djet*. Estas palabras no hacían referencia a dos fases separadas, sino a dos aspectos que, en conjunto, representaban al tiempo como un todo: indicaban sucesos temporales o hechos concluidos («perfectivo») o inacabados («imperfectivo»). Con el aspecto perfectivo se correspondía la *djet*, el tiempo de duración invariable de lo consumado. En la Biblia, Dios es alabado con las palabras «mil años a tus ojos son un ayer que pasó» (Sal 90). Por su parte, en dos himnos egipcios podemos leer: «la *djet* se encuentra ante tus ojos [Amón] como el día que ayer pasó». Por otro lado, el aspecto imperfectivo lo representaba el *neheh*, el tiempo entendido como un movimiento circular de días, meses, estaciones, años y períodos mayores que siempre volvían hasta completar el período de Sothis, de 1460 años.

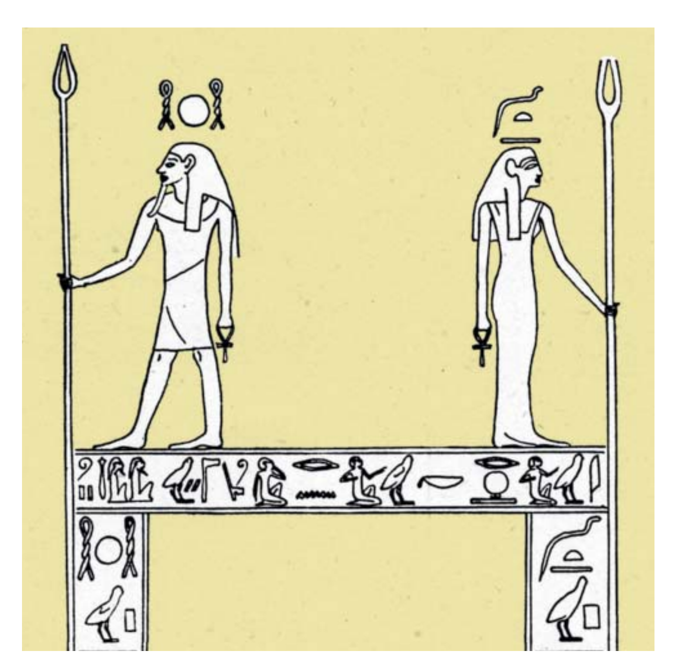
Con independencia de si se encuentra reflejada en el sistema temporal de la lengua en la que pensamos, la división del tiempo en pasado, presente y futuro goza de una clara prueba natural. Lo mismo se aplica a la división en los aspectos de «transcurso» y «conclusión». El inglés y el español se encuentran entre las pocas lenguas indoeuropeas en las que al primer aspecto le corresponde una forma gramatical propia: las perífrasis de gerundio, como «estoy viniendo». La lengua de los antiguos egipcios, por su parte, remarcaba el valor con que se medía la oposición entre ambos aspectos y basó en ello su sistema verbal. Para designar el pasado, el presente y el futuro, se ayudaban dando rodeos. Por ejemplo, existía un verbo cuyo significado era «haber hecho algo en el pasado»; el futuro se expresaba con la preposición «para, hacia, en dirección a»: para expresar «vendré», se decía «estoy para venir».

PERSONIFICACIÓN DEL DEVENIR Y EL TRANSCURRIR

Para comprender algunos conceptos egipcios, merece la pena analizar los procesos de formación de palabras, la etimología y, sobre todo, la escritura o etimografía. La palabra *neheh* resulta especialmente significativa. Su raíz es *h-h*, la cual abarca nociones como «buscar», «inundar» o «millones». A primera vista, tales conceptos no exhiben grandes semejanzas entre sí ni guardan ninguna relación con el tiempo. Sin embargo, todos comparten la idea de lo inacabado e incalculable. A partir de dicha raíz también se forman los nombres de Huh y Hauhet, las personificaciones del caos y del «infinito tiempo que aún no es». La duplicación de la *h* implica un sentido iterativo y reflexivo; indica un movimiento que gira y se repite sin cesar. Además, *neheh* se escribía con el determinativo «sol». Los determinativos eran signos que no indicaban sonidos, sino clases de significados; el del sol era el asociado a la noción de tiempo. Este determinativo se encuentra en casi todos los conceptos temporales del antiguo Egipto, como en «instante», «hora», «día», «estación», «año», «mañana» o «ayer». En particular, vemos que todos ellos se relacionan con el tiempo en su movimiento de transformación, o *neheh*. ¿Qué podría ser más idóneo como determinativo que el sol? El amanecer y el ocaso engendraban ese tipo de tiempo, y todo devenir y transcurrir dependían, en definitiva, del movimiento solar.

Para los egipcios, ese tiempo cíclico se manifestaba en todos los aspectos de la vida cotidiana: en las crecidas y bajadas del Nilo, el desarrollo y muerte de las plantas, las migraciones de los pájaros, el cambio de las estaciones, el ciclo de la vida y la muerte, la madurez y la vejez, los movimientos de los astros y las fases de la luna, el entierro y entronización de los reyes, etcétera. Todo lo que rodeaba al hombre, incluso los biorritmos de su propia existencia, indicaban la influencia del *neheh*.

La palabra *djet*, por otro lado, se acompañaba del determinativo que se refería al campo y la tierra, conceptos inherentes



Personificados: El *neheh* (*izquierda*) y la *djet* (*derecha*) sostenían el cielo. Solo su unión engendraba el tiempo y, con él, el orden del mundo. En esta reproducción de un detalle del sarcófago de Tutankamón se encuentran, sobre sus respectivas cabezas, los jeroglíficos de sus nombres.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN ALEXANDRE PIANKOFF, «LES CHAPELLES DE TOUT-ANKH-AMON», MIFAO, 72

EGIPTO Y GRECIA

El enigma de Neit

«Soy todo lo que fue, es y será». Esta inscripción acompañaba a una imagen erguida de la diosa Neit en la ciudad de Sais. ¿No parece corresponderse a la concepción occidental del tiempo? Los sabios griegos Plutarco y Proclo transmitieron el texto según sus propias categorías. Probablemente, el texto debía decir: «Soy lo que ahí está y lo que ahí aún no está». La fórmula de lo que es y lo que aún no es se repite cientos de veces.

a lo fijo y lo duradero. La *djet* designaba el tiempo de lo ya acontecido, de lo consumado. El *neheh* y la *djet* completaban un concepto general de tiempo o eternidad, así como también de género: la palabra *neheh*, el tiempo móvil, era de género masculino; la palabra *djet*, el tiempo de lo duradero, de género femenino.

Durante mi primera visita a Tebas, hace más de 40 años, hallé un himno en dos tumbas del siglo XII a.C. en el que se presentaban ambos aspectos en el contexto de la cosmología egipcia:

Se os saluda, neheh *y* djet*,*
que fundasteis el cielo sobre sus pilares,
que creasteis el cielo y lo asegurasteis dentro
de sus fronteras
para establecer allí el ba *de los dioses,*

para que Ra se levante y brille convertido en luna
en los brazos de Huh y Hauhet,
en cuya mano está el neheh*,*
y en cuyo puño, la djet.

El neheh *viene rejuvenecido,*
sacando al Nilo de su gruta
para mantener en vida a hombres y dioses;
cada mañana sale temprano
para engendrar los años
por toda la eternidad.
[Tebas] perdura, pues está fundada en los brazos
del neheh *y la* djet.
Ra se alza,
su naturaleza nónuple lleva a cabo la maat
y destruye lo injusto,
[ofreced victimas divinas a los dioses]
y víctimas mortales a los transfigurados.

(El *ba* venía a ser un análogo del alma en la mitología egipcia; de la *maat*, que simbolizaba la verdad y la justicia, hablaremos más adelante.) El *neheh* y la *djet* levantaban el cielo sobre la tierra, lo que significaba que el tiempo engendraba el espacio. Ello hacía posible el viaje de Ra, quien cruzaba el cielo convertido en sol y, curiosamente, en este himno también como luna. A medida que se formaban los días, meses, estaciones y años, el tiempo se tornaba mensurable. La palabra egipcia para «año» era «el que se rejuvenece», por eso aparecía el *neheh* rejuvenecido cuando, con la crecida del Nilo, provocaba la llegada de un año nuevo (en el oasis fluvial de Egipto, las crecidas marcaban el comienzo de un nuevo ciclo anual). Por otro lado, la separación entre el cielo y la tierra establecía una distancia entre dioses y hombres, lo que obligaba a estos a construir templos, crear imágenes, desarrollar ritos y ofrecer víctimas para conservar así su unión con esos dioses lejanos. Por ello trata la última estrofa sobre el culto en el templo. Y, del mismo modo que el cosmos mostraba pruebas de la existencia de la *djet*, esta también había de manifestarse en la cultura de los hombres: los monumentos de piedra se encargarían de plasmar la duración inmutable de la *djet*.

TIEMPO Y CULTURA

El himno nos sumerge en las cuestiones relativas a la manera en que esa representación del tiempo se plasmaba en la cultura egipcia y, en particular, a sus implicaciones religiosas. Como tiempo cíclico, el *neheh* era el tiempo del dios sol. Asociado al concepto de devenir, su signo en la escritura era el escarabajo, el símbolo central de la vida y el poder en la teología egipcia. En lugar de en torno al ser, el pensamiento egipcio giraba en torno al devenir.

En consecuencia, el *neheh* era también el tiempo del culto. Cada rito servía, en primer lugar, a la construcción y mantenimiento del *neheh*; cada culto adoptaba el carácter de un calendario ritualizado. Al igual que en Mesopotamia, los sabios de la época también se dedicaban a escudriñar el cielo. No obstante, su fin no consistía en descubrir fenómenos sorprendentes que revelasen signos para predecir el futuro y así poder dominarlo. El estudio del cosmos entre los egipcios no iba encaminado a descubrir fenómenos excepcionales, sino regulares, pues la divinidad cósmica se manifestaba en los procesos cíclicos. Los calendarios del año solar o de las fases lunares servían, ante todo, para ordenar el tiempo y mantenerlo en movimiento en el marco del culto. Un buen ejemplo nos lo proporciona el rito de las



LUKE DANIEK/ISTOCKPHOTO

Tumbas de reyes: **Con la construcción de panteones monumentales, como este dedicado a la reina Hatshepsut (siglo XV a.C.), los soberanos intentaban convertirse en parte de la eternidad. Para perdurar en el tiempo de la *djet* se necesitaban tres cosas: la perfección moral, la escritura —para dar cuenta de la anterior— y el monumento de piedra como depositario de dicha escritura y como lugar de recuerdo.**



horas: una alabanza del ciclo solar que se celebraba cada hora en todos los santuarios del país. Se trataba con ello de asistir a Ra y a los demás dioses en su incesante lucha contra la inmovilidad y la descomposición. Los egipcios creían que, sin tales esfuerzos por su parte, el sol no avanzaría.

También la estructura de los calendarios evocaba al *neheh*. Cada día del año se vinculaba a un acontecimiento mítico al que se le asignaba la cualidad de bueno, neutro o aciago. Su intención no era recoger sucesos extraordinarios o impredecibles (es decir, lo que hoy concebiríamos como hechos históricos). Más bien al contrario, solo se consideraban importantes y dignos de mención los fenómenos cíclicos. Todo lo que escapase a ese patrón —acontecimientos que otras culturas habrían elevado a la categoría de presagio— perdía cualquier sentido a los ojos de los egipcios. El tiempo del calendario no era un recipiente vacío en el que se precipitaban los sucesos, sino más bien un programa completo y lleno de sentido, el cual había de consumarse sin cesar mediante ritos para contrarrestar el influjo de los acontecimientos. Los hechos que, a pesar de todo, acontecían y que para nosotros conformarían lo que llamamos historia debían encajar en este marco.

A fin de manejar el presente, debía observarse un orden sagrado día tras día y hora tras hora. Es también por ello que resultan vanos los esfuerzos por hallar entre los antiguos textos egipcios hechos retrospectivos de mayor calado. Los escribas solo hicieron constar acontecimientos aislados, ya que consideraban que la celebración de una fiesta revestía la misma importancia que, por ejemplo, erigir un templo o derrotar al enemigo. Todo se inscribía en forma de un calendario que hacía del tiempo algo rítmico, que mantenía el orden y ofrecía un horizonte de sentido dentro del cual uno podía orientarse e identificarse.

Una cosmología conocida como *Libro de la diosa celeste Nut* describía así la salida del sol: «Nace [el dios sol] como nació por primera vez en la tierra del primer momento». Ello significaba que Ra no moría al final del ciclo diurno. Entraba en la misma tierra de la que ya había salido una vez y completaba un ciclo que solo podía dar paso a otro nuevo y, con él, a otro nacimiento. El proceso puede entenderse como la historia de la salvación en el antiguo Egipto.

Ello explica la importancia de ejecutar ritos para dar forma al tiempo a través de ellos. También lo humano debía renovarse de manera constante en su curso estatal, social y personal para retornar al estado ideal del primer momento. En el misterio de la muerte del sol cada noche y de su renacimiento cada mañana residían todas las esperanzas sobre la inmortalidad y el más allá. Existía un paralelo entre el ocaso solar y el final de la vida; en un tiempo cíclico, también el hombre podía permitirse anhelar la renovación. Por ello, en el ideario egipcio el éxito no era sinónimo de progreso, sino de retorno: un retorno al primer momento, a los arquetipos del pasado y a las normas de los ancestros.

Ayer y mañana: En su capítulo XVII, el *Libro de los muertos* representaba el *neheh* y la *djet* como dos leones que flanqueaban el sol. Uno mira al ayer y el otro, al mañana. Los dos leones simbolizan la completitud del tiempo, la cual solo surge a partir de la unión de sus dos aspectos.

Todo lo anterior atañe al *neheh*, al tiempo considerado como un movimiento cíclico. ¿Cómo se plasmaba en la cultura egipcia el aspecto complementario, el del tiempo asociado a la duración inmutable de la *djet*? La manifestación de esa faceta se hallaba en la construcción de los grandes monumentos de piedra. Aún hoy, quien visita las pirámides o los templos mortuorios del Valle de los Reyes queda envuelto en un hálito de eternidad. Con la *djet* dejamos el imperio de Ra y nos adentramos en el de Osiris, el dios de los muertos. Él mismo es un muerto y, como tal, perdura en una perfección inalterable. Así lo indica también su sobrenombre: Onofrio, «el que existe en la perfección». Del mismo modo que el tiempo del *neheh* iba unido al dios sol y al devenir, el tiempo de la *djet* se asociaba a Osiris y al ser.

TIEMPO Y MORAL

La moral en el antiguo Egipto se basaba en el convencimiento de que cada persona era llamada para rendir cuentas por sus acciones y omisiones. El tiempo aparece aquí como una relación entre hechos y consecuencias, que en la concepción egipcia era garantizada por la *maat*, un concepto que simbolizaba la verdad, la justicia y el orden. A lo largo de su vida, las personas debían llevar a cabo la *maat*: pensar en los demás y actuar para ellos. La *maat* representaba el concepto central de una ética cooperativa. Cuando todos piensan en los demás (al no olvidar las buenas acciones recibidas ni los deberes contraídos, o al corresponder a las buenas acciones), el bien cobra valor y se persigue al mal. De ahí surge la relación entre los actos y las consecuencias. Esta no actúa de manera automática, como si de una ley natural se tratase, sino solo en el ámbito del recuerdo y de los cuidados mutuos, en la consideración y las obras hacia el prójimo. El sentido o sinsentido del mundo era una cuestión de recordar u olvidar. Esta construcción moral del tiempo puede asociarse al tiempo de la memoria.

Quien obraba según los preceptos morales perduraba en la memoria para la posteridad. Más aún: solo el justo llegaba a disfrutar de la inmortalidad. Los egipcios pensaban que, tras la muerte, habrían de rendir cuentas sobre su vida ante Osiris y un tribunal de muertos. Mientras juraban haber vivido conforme a la *maat* y no haber cometido una larga lista de pecados, su corazón se colocaba sobre una balanza. Cada mentira lo tornaría más pesado, hasta acabar devorado por un monstruo. A quien, por el contrario, se hallase libre de pecado, lo tomaba Osiris en su reino y en el tiempo de duración eterna.

La culminación y la inmortalidad no se limitaban pues a los grandes monumentos, sino que suponían, ante todo, una cuestión de perfección moral. Para perdurar en el tiempo de la *djet* se necesitaban tres cosas: la perfección moral o «virtud», la escritura —para dar cuenta de la anterior— y el monumento de piedra como depositario de dicha escritura y como lugar de recuerdo. Es por ello que la función del monumento funerario egipcio no se reducía al de ser un vehículo para la memoria, sino que, parafraseando a Schiller, se erigía como institución moral.

En cualquier caso, lo peculiar de la concepción temporal en el antiguo Egipto no radicaba únicamente en la diferencia entre los dos aspectos del tiempo, sino más bien en su unión: solo juntos engendraban el *neheh* y la *djet* el tiempo. Numerosas representaciones del dios sol lo muestran de día atravesando el cielo y, por la noche, iluminando a Osiris en el mundo inferior. Esta unión nocturna entre Ra y Osiris se corresponde con la unión entre el *neheh* y la *djet*.

En la tumba de la reina Nefertari (esposa de Ramsés II, en el siglo XIII a.C.) se encuentra la imagen de una momia con cabeza de carnero, sobre la que puede verse un disco solar; la momia aparece flanqueada y protegida por las diosas Isis y Neftis. Una inscripción en la parte izquierda explica: «He aquí a Osiris, que descansa en Ra», mientras que en el lado derecho se dice: «He aquí a Ra, que descansa en Osiris». Esta unión entre quien simbolizaba el tiempo cósmico que giraba eternamente y quien representaba la persistencia inmutable de lo consumado ocurría, según la mitología egipcia, a medianoche. La cabeza de carnero representaba la forma nocturna del dios sol; la momia, a Osiris. A Osiris pertenecían también Isis y Neftis, que lo protegían, mientras que el disco solar remitía a Ra.

En el capítulo XVII del *Libro de los muertos* encontramos otra representación del tiempo: dos leones que miran hacia fuera flanquean el jeroglífico de la palabra «Achet». Esta designaba el nombre de un lugar mitológico que se hallaría entre dos montañas y por el que el sol saldría y se pondría. Junto al león izquierdo se lee «el día de mañana»; junto al derecho, «el día de ayer». El texto bajo la imagen dice:

Soy el ayer, conozco el mañana.
¿Qué significa eso?
Lo que concierne al ayer es Osiris.
Lo que concierne al mañana es Ra.

En el mismo texto también puede leerse:

Lo que concierne al neheh *es el día.*
Lo que concierne a la djet *es la noche.*

Los dos leones que flanquean el curso solar (y que representan el ayer y el mañana, la noche y el día o, en definitiva, la *djet* y el *neheh*) simbolizan la completitud del tiempo, la cual surge de la unión de sus dos aspectos.



Ra y Osiris: Ra, el dios solar, se asociaba al *neheh*, el tiempo cíclico; Osiris, el dios de los muertos, a la eternidad o *djet*. Ambos se unían a medianoche. En esta imagen, procedente de la tumba de la reina Nefertari (siglo XIII a.C.), la cabeza de carnero representaba la forma nocturna del dios sol; la momia, a Osiris.

Pero no solo el cosmos, sino también el hombre vivía ambas facetas del tiempo de manera simultánea. En la ejecución de los ritos, cuyo proceso siempre idéntico reproducía el retorno perpetuo de los ciclos cósmicos, el hombre se inclinaba hacia el *neheh*; al levantar monumentos, se aproximaba a la *djet*. Tras la muerte, su deseo era entrar en el tiempo cósmico, que incluía ambas facetas: el tiempo de las estrellas y el de las piedras. Por ello, durante los rituales de embalsamamiento, los sacerdotes oraban del siguiente modo:

Que tu ba *exista mientras en el* neheh *viva*
como Orion en el cuerpo de la diosa del cielo,
y mientras tu cadáver en la djet *permanezca*
como la piedra de las montañas.

PARA SABER MÁS

Egipto: A la luz de una teoría pluralista de la cultura. Jan Assmann. Akal, 1995.
Egipto: Historia de un sentido. Jan Assmann. Abada Editores, 2005.


N
NW
NE
W
E
SW
SE
S

Lera Boroditsky es profesora de psicología cognitiva en la Universidad de Stanford y redactora jefa de *Frontiers in Cultural Psychology*. Su investigación se orienta a la representación mental y los efectos del lenguaje sobre la cognición.



PSICOLOGÍA COGNITIVA

Lenguaje y pensamiento

El idioma que hablamos afecta a nuestra percepción del mundo

Lera Boroditsky

Me encuentro en Pormpuraaw, una pequeña comunidad aborigen situada en el borde occidental del cabo York, en el extremo septentrional de Australia. A mi lado hay una niña de cinco años. Cuando le pido que señale el norte, lo hace con exactitud y sin dudar. Mi brújula lo confirma. Algo después, en Stanford, en una sala de conferencias, le hago la misma petición a un público de elevado nivel académico, en el que abundan personas de reconocido mérito científico galardonadas por su talento. Algunos de ellos han estado viniendo a esta misma sala desde hace más de cuarenta años. Les ruego a los presentes que cierren los ojos —para que no falseen el resultado de la prueba— y que señalen al norte. Muchos rehúsan, pues ignoran la respuesta. Quienes aceptan, reflexionan unos instantes y después apuntan... en todas direcciones. He repetido este ejercicio en Harvard y en Princeton, en Moscú y en Pekín, siempre con los mismos resultados. Una niña de cinco años perteneciente a cierta cultura logra con facilidad lo que a eminentes científicos de otras culturas les resulta problemático. Una diferencia notable en una destreza cognitiva. ¿Cómo explicarla? La sorprendente respuesta puede hallarse, según parece, en el lenguaje.

La idea de que algunas capacidades cognitivas quizá dependan del idioma que hablamos se remonta a varios siglos. Desde los años treinta del siglo xx, la idea se ha asociado a los lingüistas Edward Sapir y Benjamin Lee Whorf, que estudiaron la variación de las lenguas y propusieron la hipótesis de que los hablantes de idiomas diferentes se distinguiesen en su forma de pensar. Si bien en un principio la hipótesis recibió gran atención, adolecía de un serio inconveniente: una carencia casi total de pruebas empíricas que la respaldasen. Cuarenta años después, el desencanto era casi general y la hipótesis de Sapir y Whorf quedó enterrada bajo otras teorías que proclamaban la universalidad del lenguaje y el pensamiento. Décadas después, ha aparecido una cantidad considerable de pruebas empíricas sólidas que demuestran que los idiomas sí moldean el pensamiento. Estos indicios dan la vuelta al dogma de la universalidad y aportan fascinantes indicios para entender los orígenes del conocimiento y los mecanismos de construcción de la realidad. Los resultados entrañan consecuencias importantes para la jurisprudencia, la política y la educación.

SECUELAS DEL LENGUAJE

En el mundo se habla un formidable repertorio de lenguajes: unos 7000. Cada uno requiere de sus hablantes habilidades muy diferentes. Supongamos que deseo explicar que vi la obra *Tío Vania* en la calle 42. Expresado en idioma mian, hablado en Papúa Nueva Guinea, el verbo habría especificado si tal suceso acababa de ocurrir, si aconteció ayer o si corresponde a un pasado lejano. En indonesio, por el contrario, ni siquiera habría revelado si el suceso ya había ocurrido o tardaría poco en hacerlo. En ruso, la forma verbal hubiera delatado si el hablante era hombre o mujer. En chino mandarín habría que aclarar si Vania era tío por línea materna o paterna y si el parentesco era carnal o por matrimonio, pues existen diferentes palabras para cada una de esas clases de tíos (en el caso de Vania, se trata del hermano de la madre, como claramente especifica la traducción china). Por otra parte, en pirahã, una lengua amazónica, sería imposible decir «42» porque no existen numerales exactos, sino solo palabras para expresar «pocos» y «muchos».

Los idiomas difieren en un sinfín de aspectos. Pero del mero hecho de que las personas se expresen de un modo u otro no se sigue que piensen diferente. ¿Cómo saber si los hablantes de

EN SÍNTESIS

Los humanos nos comunicamos mediante una enorme variedad de lenguajes que se diferencian de manera notable en la manera en que expresan la información.

Desde hace largo tiempo se ha considerado la pregunta sobre si los hablantes de uno u otro idioma podrían exhibir capacidades cognitivas diferentes.

En años recientes han aparecido pruebas empíricas de la existencia de una relación causal entre nuestra lengua materna y nuestra forma de pensar sobre numerosos aspectos.

TOM WHALEN

mian, ruso, indonesio, mandarín o pirahã actúan, recuerdan o reflexionan sobre el mundo de manera diferente en razón de la lengua que hablan? Numerosas investigaciones recientes han revelado que el lenguaje da forma incluso a las nociones más básicas de la experiencia humana: espacio, tiempo, causalidad o las relaciones con los demás.

Retornemos a Pormpuraaw. La lengua kuuk thaayorre que allí se habla no se vale de términos espaciales relativos, como «derecha» o «izquierda». Sus hablantes se expresan mediante los puntos cardinales. También en nuestro idioma contamos con voces para indicar esas direcciones, pero normalmente solo las utilizamos para referencias geográficas o en distancias grandes. No se nos ocurriría decir «¡Han colocado los cuchillos de carne al sudeste de los de pescado... qué brutos!». Pero en kuuk thaayorre se utilizan direcciones cardinales a todas las escalas, por lo que uno acaba diciendo «la copa está al sudeste de la bandeja», o «el joven que está al sur de Mary es mi hermano». En Pormpuraaw es preciso estar siempre orientado, aunque solo sea para hablar con propiedad.

Por otra parte, los trabajos seminales realizados durante las dos últimas décadas por Stephen C. Levinson, del Instituto Max Planck de Psicolingüística de Nimega, y John B. Haviland, de la Universidad de California en San Diego, han demostrado que las personas que se basan en direcciones absolutas muestran una enorme habilidad para orientarse dondequiera que se hallen, ya se trate de paisajes desconocidos o de edificios en los que no han entrado nunca. De hecho, lo hacen mejor que quienes viven en los mismos lugares pero no hablan esas lenguas, y mejor incluso de lo que los científicos creían que nadie pudiera llegar a hacerlo. Los imperativos de su idioma les obligan a poseer y ejercitar esa proeza cognitiva.

Es probable que quienes piensan en el espacio de manera distinta también razonen de otro modo sobre el tiempo. Junto a mi colaboradora Alice Gaby, de la Universidad de California en Berkeley, entregamos a hablantes de kuuk thaayorre conjuntos de fotografías que mostraban secuencias cronológicas: el envejecimiento de un hombre, el crecimiento de un cocodrilo o un plátano al que cada vez le faltaban más bocados. Barajamos las fotos y les pedimos que las ordenasen en el suelo en el orden cronológico correcto. Realizamos la prueba dos veces con cada sujeto, pero cada vez le situamos mirando hacia un punto cardinal distinto. Los hablantes de idiomas europeos suelen ordenar la serie con una progresión temporal que vaya de izquierda a derecha. Los de árabe o de hebreo, en cambio, tienden a orientarla de derecha a izquierda. Se observa así que la orientación de la escritura influye en la manera en que organizamos secuencias temporales. Los kuuk thaayorre, sin embargo, no disponían las tarjetas ni de izquierda a derecha ni de derecha a izquierda: las ordenaban siempre de este a oeste. Es decir, cuando se sentaban mirando al sur, las tarjetas iban de izquierda a derecha. Cuando miraban al este, la sucesión evolucionaba hacia ellos, etcétera. En ningún caso les informamos de la orientación en la que se encontraban; los kuuk thaayorre lo sabían de antemano y se valían de ello para elaborar sus orientaciones temporales.

En distintos lugares del mundo, las representaciones del tiempo difieren en numerosos aspectos. En nuestra cultura, el futuro se halla «adelante» y el pasado, «atrás». En 2010, Lunden Miles, de la Universidad de Aberdeen, observó que los anglohablantes inclinaban de manera espontánea el cuerpo hacia delante cuando pensaban en el futuro, y hacia atrás cuando se referían al pasado. Pero en aymara, una lengua andina, se dice que el pasado se encuentra «enfrente» y el futuro, «detrás». El lenguaje corporal de los aymara concuerda con su forma de hablar: en 2006, Raphael Núñez, de la Universidad de California en San Diego, y Eve Sweetser, de la Universidad de California en Berkeley, observaron que los aymara gesticulaban hacia el frente cuando hablaban del pasado y hacia atrás cuando aludían al futuro.

> Hablantes de idiomas distintos difieren a la hora de recordar quién llevó a cabo una determinada acción

RECORDAR QUIÉN FUE

Los hablantes de un idioma u otro difieren también en su descripción de los acontecimientos y, en consecuencia, a la hora de recordar quién llevó a cabo una acción determinada. Todos los sucesos, incluso los accidentes ocurridos en fracciones de segundo, son complejos y exigen de nosotros analizar e interpretar lo ocurrido. Tomemos como ejemplo el incidente de caza que protagonizó el antiguo vicepresidente de EE.UU. Dick Cheney, quien disparó por accidente sobre el abogado Harry Whittington. Podríamos decir que «Cheney disparó sobre Whittington», donde Cheney aparece como causa directa; pero también que «Whittington recibió un disparo de Cheney», lo que distancia a Cheney del resultado. Podríamos incluso afirmar que «Whittington recibió una buena perdigonada», olvidándonos por completo de Cheney. El propio Cheney lo puso así: «En última instancia, yo fui quien pulsó el gatillo que disparó el cartucho que dio a Harry», interponiendo una larga cadena de sucesos entre sí mismo y el resultado. La descripción del entonces presidente Bush («él [Cheney] oyó el aleteo de un pájaro; se volvió, apretó el gatillo y vio que su amigo había sido herido») supuso una obra maestra de arte exculpatorio que, en una sola línea, convirtió a Cheney de responsable en mero testigo.

El público de habla inglesa rara vez se deja impresionar por una contorsión lingüística como la anterior, ya que, en inglés, son las oraciones carentes de agente las que desprenden una connotación evasiva. Los hablantes de lengua inglesa tienden a formular los hechos en términos de alguien que hace algo, con preferencia por las construcciones transitivas, del estilo de «Juan rompió el florero», aunque el hecho haya sido accidental. Los japoneses o hispanohablantes, en cambio, se muestran más reticentes a mencionar a un agente cuando se trata de un acontecimiento accidental. En español podría decirse «se rompió el florero». En cambio, una formulación en inglés que omita el agente (*«the vase broke»* o *«the vase broke itself»*), no resulta tan natural en ese idioma.

Mi estudiante Caitlin M. Fausey y yo hemos hallado que tales diferencias lingüísticas influyen en la comprensión de lo ocurrido e implican consecuencias a la hora de presentar testimonio. En nuestros estudios, publicados en 2010, participaron hablantes de inglés, español y japonés. Les mostramos vídeos en los que dos muchachos reventaban globos, rompían huevos y derramaban bebidas, en ocasiones a propósito y, en otras, sin quererlo. Después, les sometimos por sorpresa a un test de memoria: para cada uno de los sucesos debían señalar al joven que lo había provocado, como en una rueda de sospechosos. A otro grupo de hablantes de las mismas lenguas solo les pedimos que describiesen los hechos. Cuando comparamos los recuerdos del primer grupo con las descripciones del segundo, encontramos relaciones entre ambos.

Los hablantes de los tres idiomas describieron los sucesos intencionados asignándoles un sujeto agente, como «el más alto pinchó el globo». Además, todos recordaron con igual precisión a los autores de los hechos. Sin embargo, en el caso de los sucesos accidentales, aparecieron diferencias interesantes. A la hora de describirlos, los hispanohablantes y los japoneses eran menos propensos que los sujetos de habla inglesa a asignarles un agente. Y, de hecho, también recordaban peor que los anglohablantes a los autores de los hechos accidentales. Ello no pudo deberse a que su memoria fuese peor, puesto que antes habían recordado con tanta precisión como los hablantes de lengua inglesa quiénes habían perpetrado los actos intencionados.

Los idiomas influyen no solo en lo que recordamos, sino que, según su estructura, también pueden facilitar o dificultar el aprendizaje de nuevos conocimientos. En algunas lenguas, las palabras que designan los numerales reflejan con mayor claridad el sistema decimal subyacente. En mandarín, por ejemplo, no existen números como el 11 o 13, con nombres «excepcionales»; los niños aprenden antes el sistema de numeración. También según el número de sílabas que posean los nombres de los numerales, resulta más fácil o difícil recordar cadenas de números (como números de teléfonos) o efectuar cálculos mentales.

El lenguaje afecta incluso a la edad con la que los niños se hacen conscientes de su propio sexo. En 1983, Alexander Guiora, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, comparó tres grupos de niños cuyo idioma materno era, respectivamente, hebreo, inglés y finés. El hebreo marca el género en un gran número de casos gramaticales; incluso el pronombre «tú» cambia de forma según el género. En finés no existe distinción entre géneros, y el inglés viene a situarse entre ambos. Guiora halló que los niños que se criaban en ambientes de habla hebrea averiguaban su propio sexo un año antes que los niños fineses. Los de habla inglesa lo hacían a un tiempo intermedio.

LA GALLINA O EL HUEVO

Los ejemplos anteriores constituyen tan solo una pequeña muestra de los numerosos hallazgos relativos a las diferencias cognitivas que manifiestan los hablantes de idiomas distintos. Pero ¿cómo saber si son las diferencias lingüísticas las que crean diferencias en el pensamiento, o si es a la inversa? La respuesta, al parecer, es que se trata de un proceso bidireccional: la forma en que pensamos influye en nuestro idioma, pero también ocurre en sentido inverso. Durante el pasado decenio se idearon toda una serie de demostraciones para indicar que el lenguaje desempeñaba una función causal en los procesos cognitivos. Por ejemplo, se ha comprobado que, al cambiar la forma en que hablamos de algo, se modifica nuestro modo de concebirlo. Al enseñar a alguien nuevas voces para describir los matices de un color, aumenta su capacidad para distinguirlos. Y al enseñar a una persona otras formas de hablar sobre el tiempo cronológico, esta aprende a pensar en él de maneras diferentes.

Otro enfoque para afrontar la pregunta proviene del estudio de personas bilingües. Se ha verificado que los hablantes bilingües modifican su visión del mundo en función del idioma que estén utilizando. Dos investigaciones publicadas en 2010 demostraron que, incluso en asuntos tan básicos como quién nos gusta y quién no, la respuesta depende del idioma en que se nos pregunte. En los estudios, uno realizado por Oludamini Ogunnaike y sus colaboradores, de Harvard, y el otro por el equipo de Shai Danziger, de la Universidad de Ben-Gurion en el Negev, participaron individuos bilingües de francés y árabe en Marruecos, de español e inglés en EE.UU., y de árabe y hebreo en Israel. En cada caso, el fin consistía en determinar los prejuicios y sesgos de los participantes.

A los bilingües de hebreo y árabe se les pidió que pulsaran con rapidez una tecla como respuesta a ciertas palabras en determinadas situaciones. En una de ellas, si veían un nombre judío, como «Yair», o un término positivo, como «bueno» o «fuerte», debían pulsar la tecla «M»; si veían un nombre árabe, como «Ahmed», o un rasgo negativo, como «malvado» o «débil», debían pulsar la «X». En otra situación, el emparejamiento se invertía, por lo que los nombres judíos y los rasgos negativos compartían una tecla, y los nombres árabes y los rasgos positivos, otra. Los investigadores midieron la rapidez con la que los participantes respondieron en una situación y otra. Tareas similares se emplean muy a menudo para determinar sesgos automáticos o involuntarios, como en qué medida algunos individuos asocian de manera natural rasgos positivos o negativos con grupos étnicos. Para su sorpresa, los investigadores hallaron un fuerte desplazamiento de los sesgos involuntarios según el lenguaje en que se efectuase la prueba. Por su parte, los bilingües de árabe y hebreo expresaron actitudes implícitas más positivas hacia los judíos cuando la prueba se efectuó en hebreo que cuando se hizo en árabe.

El idioma parece intervenir en muchas más facetas de las que los expertos suponían. Nos apoyamos en el lenguaje incluso para tareas tan sencillas como distinguir manchas de color, contar los lunares en una pantalla u orientarnos en una sala de tamaño reducido: mis colaboradores y yo hemos comprobado que, si se dificulta a las personas el acceso a sus facultades lingüísticas (por ejemplo, al pedirles que realicen al mismo tiempo una tarea verbal exigente, como repetir un boletín de noticias), merma su destreza en todas esas tareas simples. Ello implica que las categorías y distinciones que existen en un idioma participan en numerosos aspectos de nuestra vida mental. Lo que los investigadores han llamado desde hace tiempo «pensamiento» parece consistir en una colección de procesos tanto lingüísticos como no lingüísticos. Por lo que sabemos, puede que, en la mayor parte del pensamiento adulto, el lenguaje juegue algún papel.

Uno de los rasgos que definen a la inteligencia humana es su adaptabilidad, la facultad para inventar y reorganizar la manera de entender el mundo y acomodarla a objetivos y ambientes variables. Una consecuencia de ello se manifiesta en la multitud de lenguajes existentes en el mundo. Cada uno dispone de su propio conjunto de recursos cognitivos y encierra el conocimiento y la visión de la realidad que cada cultura ha ido desarrollando a lo largo de milenios. Cada idioma contiene una forma de percibir, categorizar y dar sentido al mundo; una guía de valor incalculable desarrollada y afinada por nuestros antepasados. Investigar de qué manera el idioma moldea el pensamiento nos proporciona una gran herramienta para explicar los orígenes del conocimiento, los mecanismos de construcción de la realidad y cómo hemos alcanzado la inteligencia y refinamiento que ahora poseemos. Algo que nos ayuda a comprender la esencia misma de lo que nos hace humanos.

PARA SABER MÁS

Language changes implicit associations between ethnic groups and evaluation in bilinguals. Shai Danziger y Robert Ward en *Psychological Science*, vol. 21, n.º 6, págs. 799-800, junio de 2010.

Constructing agency: The role of language. Cailin M. Fausey et al. en *Frontiers in Cultural Psychology*, vol. 1, artículo 162, publicado online el 15 de octubre de 2010.

Remembrance of times east: Absolute spatial representations of time in an Australian Aboriginal community. Lera Boroditsky y Alice Gaby en *Psychological Science*, vol. 21, n.º 11, págs. 1635-1639, noviembre de 2010.

por Magda Vila y José M. Franco

La toxicidad de *Ostreopsis*

Las proliferaciones de la microalga podrían ocasionar irritaciones en las vías respiratorias o la piel

A diferencia de las microalgas planctónicas, las bentónicas de mares templados apenas han sido estudiadas por la comunidad científica. Sin embargo, desde que en verano de 2004 se detectaron en el Mediterráneo varios episodios de proliferaciones tóxicas de *Ostreopsis*, los estudios sobre dinoflagelados bentónicos se han multiplicado. Estos microorganismos viven encima de macroalgas, principalmente feofíceas y rodofíceas; se multiplican de manera desmesurada y forman un mucílago marrón que recubre las macroalgas (*fotografía de fondo*). En estas situaciones el fondo marino adquiere un aspecto lúgubre, sin color, en que se ve afectada la fauna marina con movimiento limitado, como erizos y estrellas de mar, que pueden sufrir una mortalidad masiva. El efecto letal de *Ostreopsis* se debe a sus potentes toxinas, como la palytoxina y sus análogos, que hasta el momento se han identificado en muestras de agua marina y en el mucílago que recubre las macroalgas. Pero lo más relevante es que tales proliferaciones se han relacionado con intoxicaciones humanas: tanto bañistas como personas que viven o trabajan en la línea de costa de distintas playas del litoral Mediterráneo han padecido irritaciones de las vías respiratorias superiores, de la piel o de ambas a la vez. Se trata de unos pocos centenares de afectados que no necesariamente han estado en contacto directo con el agua y cuyos síntomas más agudos han cesado al poco tiempo de alejarse de la playa.

La hipótesis del proyecto científico vigente EBITOX plantea que las microalgas o sus toxinas podrían ser transportadas por el aire en forma de pequeñas gotas, o aerosoles marinos, hasta el litoral y ocasionar allí las intoxicaciones humanas. El objetivo del proyecto es detectar la presencia de la toxina o del propio *Ostreopsis* en el aerosol marino, lo que confirmaría la causalidad entre las proliferaciones bentónicas y las intoxicaciones respiratorias observadas en determinadas playas.



Durante las proliferaciones de *Ostreopsis* pueden observarse «flores de agua»; se trata de acumulaciones del dinoflagelado que flotan en la superficie del agua junto con pequeños fragmentos de macroalgas.

MAGDA VILA (*todas las fotografías*); JOSÉ M. FORTUÑO Y MAGDA VILA (*microfotografía*)



Macroalga recubierta por el mucílago vista al microscopio óptico. Las pequeñas células (*Ostreopsis* y otros organismos) unidas por un filamento de mucílago, nadan alrededor de la macroalga.

Las playas afectadas por las proliferaciones bentónicas son de sustrato rocoso donde abundan las macroalgas. La microalga *Ostreopsis* es epífita y vive encima de distintas especies de macroalgas.

Microfotografía de la comunidad de microalgas de verano al microscopio electrónico de barrido. La comunidad es dinámica, se suceden distintas especies a lo largo del ciclo anual: en invierno proliferan las diatomeas bentónicas; en primavera despiertan los dinoflagelados no tóxicos del género *Coolia*, que en pleno verano serán sustituidos por los dinoflagelados tóxicos del género *Ostreopsis*, entre otros.

por Josep Simon



Josep Simon es experto en historia de la física y la enseñanza en el siglo XIX. Desarrolla su investigación postdoctoral en la Universidad París-Oeste y colabora con el Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero.

Ganot, Rey

O la república de los lectores de física

> *"Paradox: Entonces, ¿qué hacemos? ¿Intentamos una Constitución, ó simplemente señalamos á uno cualquiera para que sea rey?"*
>
> *Pío Baroja*

En el cementerio de Montrouge, a escasos kilómetros del bullicio del Barrio Latino de París, yacen los restos de Adolphe Ganot (1804-1887). La estela que corona su tumba se encuentra caída sobre la lápida, impidiendo leer cualquier inscripción que distinga esta tumba de otras y que nos dé algún indicio de cómo vieron sus contemporáneos a este profesor y autor de física, al final de su vida.

El abandono en que se encuentra la tumba de Ganot nos ofrece una poderosa imagen del olvido en que a menudo caen los docentes. Adolphe Ganot, profesor de ciencias establecido en París hacia mitad del siglo XIX, fue también director de una escuela privada preparatoria para el *baccalauréat-ès-sciences* (el examen que coronaba la enseñanza secundaria y daba acceso a las carreras científicas y médicas en Francia) y autor de dos libros de texto de física. Sin embargo, su producción como investigador se limita a la obra pedagógica y a algunas humildes patentes de inventos, relacionados con las tecnologías de la máquina de vapor o de la iluminación a gas. Ganot es pues un «cualquiera», un personaje ajeno a la élite científica de su época.

No resulta extraño, pues, que su nombre brille por su ausencia en las principales síntesis históricas sobre la física. La penúltima obra publicada en este género no es una excepción. En *When Physics Became King*, Iwan Morus ofrece una interesante narrativa de los procesos que mediaron en la constitución de la física como disciplina en el siglo XIX. A principios de siglo, la filosofía natural comprendía una serie de áreas inconexas en el estudio de la naturaleza. Las investigaciones sobre la luz, el calor, la electricidad o el magnetismo tenían lugar de manera separada; a cada uno de estos fenómenos se le atribuían causas y agentes diferentes. A finales de siglo se había constituido un marco unificado, mediante el principio de conservación de la energía y métodos de trabajo centrados en la precisión experimental y el análisis matemático. La física había sido institucionalizada como disciplina con su propio espacio académico, social y político, y entronizada como paradigma y cabeza visible de la empresa científica.

Si la historia que cuenta Morus se distingue de versiones previas es por el protagonismo que da a los divulgadores que, en el siglo XIX, comunicaron la física a amplios espectros de la sociedad a través de demostraciones experimentales en auditorios de índole diversa. Pero Morus deja de lado el contexto de la enseñanza formal. Sin embargo, el desarrollo de la enseñanza secundaria durante el siglo XIX y la introducción de las ciencias en este contexto educativo tuvieron un papel fundamental en la emergencia de la física como disciplina. A través de este fenómeno se configuró un colectivo humano que contribuyó a fijar los límites, contenidos y orientaciones de esta área de conocimiento y a dotarla de un espacio académico, cultural y social bien definido. El creciente número de estudiantes y lectores de física a este nivel supera con mucho el de alumnos que se licenciaron o doctoraron en física en Francia a lo largo del siglo. Como veremos, Adolphe Ganot no fue un cualquiera. Y, lo que es más importante, su figura nos ayuda a entender la génesis de la física como disciplina científica.

La génesis de la física de Ganot

Tras ejercer como profesor de ciencias durante veinte años, Adolphe Ganot publicó en 1851 en París su *Traité élémentaire de physique experimentale et appliquée*. En 1859, publicó un segundo libro, el *Cours de physique purement expérimentale*, con la intención de extender y diversificar el número de lectores de su física. Entre 1851 y 1884, produjo dieciocho ediciones del primer título y ocho del segundo; vendió en Francia y en el extranjero más de 200.000 y 64.000 copias, respectivamente. Durante el siglo XIX, el *Traité* fue traducido a once lenguas; el *Cours*, a seis. Mediante sus ediciones originales y las traducciones al castellano y al inglés, los libros de Ganot se convirtieron rápidamente en la introducción estándar a la física en los cinco continentes. A pesar de su origen humilde, la *Física* de Ganot, en sus dos versiones, es quizás el libro de física más leído durante el siglo XIX; supera con creces, en número de copias vendidas, a clásicos científicos mucho más reconocidos, como el *Origen de las Especies* de Darwin.

El enorme impacto internacional de la física de Ganot es producto de unas condiciones locales particulares, que tienen como escenario el París de mediados de siglo XIX. La génesis de la obra de Ganot estuvo estrechamente conectada con su labor docente y con el espacio en el que la ejerció. Ganot se curtió como profesor en el competitivo mercado educativo parisino. En el Barrio Latino, en el entramado de calles que rodeaban a la facultad de medicina, la facultad de ciencias, la Escuela Politécnica y las principales escuelas de enseñanza secundaria, se concentraron durante el siglo XIX un gran número de libreros, fabricantes de instrumentos científicos y escuelas preparatorias que compitieron por la misma clientela. El resultado: una industria educativa y científica compacta y poderosa, que no se limitó a satisfacer las necesidades del mercado parisino, sino que encontró aliados fundamentales para su expansión en la red francesa de escuelas y facultades estatales y en la exportación a otros países.

La física de Ganot es un producto de ese contexto y ese mercado. Su estructura refleja los programas del *baccalauréat-ès-sciences*, el principal objetivo de los

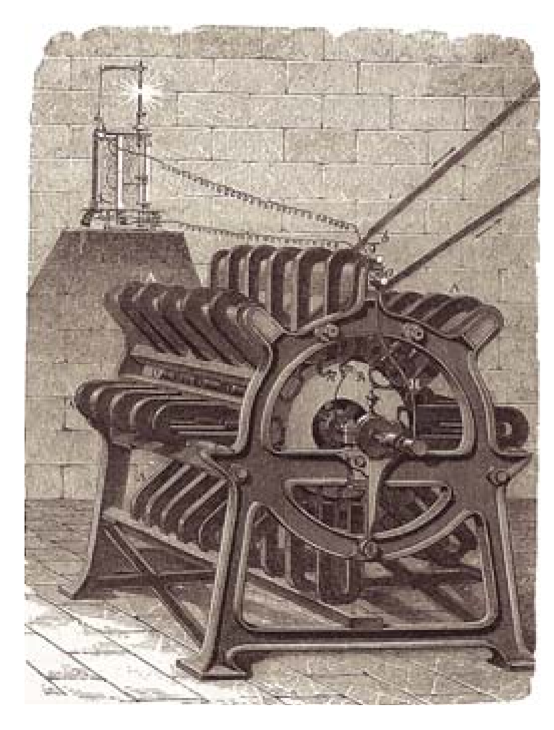
alumnos de Ganot. Durante las décadas centrales del siglo, los dominios y públicos de este examen fueron ampliados al equipararlo en importancia al tradicional *baccalauréat* de letras y exigirlo como acceso a las carreras de medicina, farmacia, ciencias e ingenierías. Escuelas privadas como la de Ganot tuvieron un papel fundamental en la definición de la pedagogía y estructura de las ciencias. Ganot desarrolló su labor en un espacio urbano reducido pero dinámico en el que convivieron profesores, estudiantes, libreros, investigadores, fabricantes de instrumentos, impresores y artistas asociados en empresas educativas, científicas y tecnológicas colectivas como el mercado educativo francés y las numerosas exposiciones universales celebradas en la capital.

La física como empresa colectiva

Como producto del contexto cultural en el que fueron publicados, los libros de Ganot se deben a un gran número de influencias y tradiciones. Por otro lado, la cultura que glorifica al autor que firma la obra literaria, condicionada por leyes de protección de los derechos de autor desarrolladas en el siglo XIX, resulta insuficiente para comprender la sustancia de la obra ganotiana.

La física de Ganot es heredera de una larga trayectoria de desarrollo de herramientas pedagógicas y científicas, iniciada a principios de siglo con las reformas Napoleónicas que promovieron el uso de libros de texto para consolidar las disciplinas escolares y universitarias, y sus métodos pedagógicos. La tradición de la física-texto desarrollada durante la primera mitad del siglo posee nombres ilustres: Haüy, Biot, Pouillet, Péclet y Despretz, investigadores reputados que tuvieron también un papel importante en la enseñanza de la física y en numerosos casos iniciaron su carrera en la enseñanza secundaria.

Pero la física de Ganot debe mucho también a agentes insospechados, como impresores e ilustradores, ausentes en las historias clásicas de la física. Se centra en la descripción de instrumentos científicos y procedimientos experimentales, y favorece el conocimiento práctico e inductivo frente a las hipótesis teóricas y las matemáticas complejas. El impacto global de la física ganotiana está directamente conectado con su papel pionero en la introducción de un nuevo tipo de ilustración, basada en nuevas técnicas de grabado en madera, y en la inserción de las ilustraciones en el texto. Las técnicas previas ofrecían ilustraciones de instrumentos científicos más esquemáticas y menos



La física de Ganot se distinguió por su decidida apuesta por la descripción de instrumentos científicos y su uso en prácticas experimentales e industriales frente a las hipótesis teóricas y los desarrollos matemáticos complejos (en la imagen, máquina eléctrica de Florise Nollet).

A. GANOT, *TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE ET APPLIQUÉE*, CHEZ L'AUTEUR-ÉDITEUR, PARÍS, 1860

realistas, que se incluían en láminas plegadas al final de los libros. En este proceso innovador, Ganot fue solamente coordinador y mediador del talento de los impresores e ilustradores con los que convivió profesionalmente. La ilustración de la física de Ganot nos muestra también que el conocimiento visual tiene una lógica propia, más allá del texto, y una capacidad de producir conocimiento original que transciende la función meramente decorativa. Entenderemos mejor este fenómeno si consideramos quiénes fueron los lectores de la física de Ganot y el modo en que la emplearon.

La república

Amén de convertirse en *best sellers* internacionales, los libros de Ganot ejercieron una penetración transversal dentro de cada cultura nacional: sus lectores se repartían entre todas las clases sociales y en contextos educativos, profesionales y culturales muy diversos.

La física de Ganot se usaba sobre todo para preparar exámenes, pero también para la pedagogía escolar diaria. Fue libro de cabecera para el divulgador de las ciencias, que se inspiró o copió texto e ilustraciones para sus propios libros o conferencias públicas. Fue leída por obreros mecánicos, ebanistas y estibadores, y también por miembros de las clases acomodadas, todos ellos interesados en conocer los últimos desarrollos científicos. A pesar de su origen pedagógico, la obra de Ganot fue utilizada también por eminentes investigadores como el químico William Crookes, el ingeniero y físico William Thomson (Lord Kelvin) o el inventor y empresario industrial Zénobe Gramme. Para estos, las ilustraciones del libro constituían potentes herramientas, que ofrecían conocimiento directo de los últimos avances en el diseño de instrumentos científicos y máquinas.

Los lectores de Ganot tuvieron también un impacto directo en su obra. A cada edición de sus libros, aparecieron numerosas reseñas en la prensa científica, de divulgación y general. También cartas de lectores, que a menudo ensalzaron la física de Ganot y señalaron algunos errores con el único fin de mejorar una obra que consideraron patrimonio colectivo. El autor tomó nota de la opinión de sus lectores y corrigió esos errores en sucesivas ediciones.

El conjunto de los lectores de la física de Ganot define una república, con una constitución basada en el establecimiento de la física como disciplina, a través de dos libros de texto que se convirtieron en canon colectivo de la cultura del siglo XIX.

PARA SABER MÁS

When physics became king. I. R. Morus. The University of Chicago Press, Chicago, 2005.

Between teaching and research: Adolphe Ganot and the definition of electrostatics (1851-1881). J. Simon y P. Llovera en *Journal of Electrostatics*, vol. 67, n.º 2-3, págs. 536-547; 2009.

La escritura como invención: la física-texto de Adolphe Ganot y el género ciencia. J. Simon en *Cultura Escrita y Sociedad*, vol. 10, abril, págs. 81-106; 2010.

Communicating physics: the production, circulation and appropriation of Ganot's textbooks in France and England, 1851-1887. J. Simon. Pickering and Chatto; Londres, 2011.

Pueden encontrarse versiones digitales de ediciones de los libros de Ganot en francés, castellano e inglés en las bibliotecas digitales: Gallica, Biblioteca Cervantes, Internet Archive, Google Books y Hathi Trust.

por Agustí Lledós

Agustí Lledós es catedrático de química física en la Universidad Autónoma de Barcelona.



¿Se acabaron los genios?

Nuestras universidades siguen ancladas en modelos organizativos obsoletos, lejos de la interdisciplinariedad que exigen los retos científicos actuales

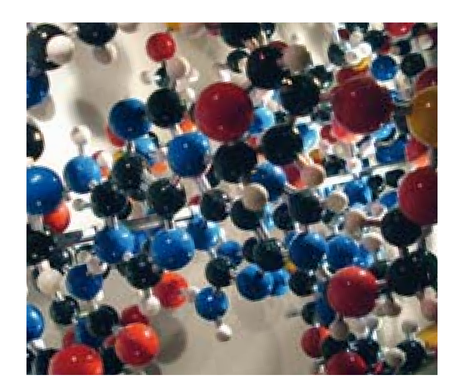
La idea del científico como un genio solitario todavía forma parte del imaginario colectivo. Sin embargo, hace ya decenios que esta imagen no se corresponde con la realidad, sobre todo en el campo de las ciencias experimentales y, en particular, en el de la química, el que mejor conozco. El extraordinario desarrollo de la ciencia en el siglo xx trajo consigo la aparición de una nueva estructura básica en la que el científico desarrollaba su actividad: el grupo de investigación.

Por otro lado, la labor de los investigadores se ha visto condicionada por la progresiva especialización. Ello ha sucedido con todas las ciencias. Durante el siglo xx, la química se subdividió en cuatro grandes áreas: analítica, física, inorgánica y orgánica. Ello afecta no solo a la estructura organizativa de nuestras universidades, sino también a los planes de estudio. La famosa «adaptación al espacio europeo» (el proceso Bolonia) ha sido en nuestras universidades un ejercicio sobre *cómo* se enseña, pero no sobre otra cuestión fundamental: *¿qué* se enseña?. El respeto de la subdivisión en cuatro áreas, que en nuestro país se llaman «de conocimiento» pero que son también «de repartimiento» puesto que articulan la distribución de todo tipo de recursos en las universidades, ha sido un tema tabú.

Los objetivos de la ciencia han evolucionado a lo largo de los siglos, en función de los retos de la humanidad. Sin embargo, cuando una ciencia alcanza un grado de madurez notable, como es el caso de la química, suele volverse conservadora y reacia a cambios, aunque estos sean indispensables para su desarrollo. El grupo de investigación como unidad básica y la subdivisión en cuatro áreas han sido dos elementos clave para el extraordinario desarrollo que ha experimentado la Química en el siglo xx. La cuestión que debemos plantearnos es: ¿lo siguen siendo hoy?

Durante los últimos años hemos asistido a un cambio radical en la definición de los problemas científicos. El enfoque ya no es disciplinario, sino social. Los grandes retos de la química son hoy globales. Se articulan alrededor de tres ejes: (1) comprender los procesos biológicos y aplicar ese conocimiento al servicio del bien común; (2) transformar la manera de generar, suministrar, transmitir, almacenar y usar la energía; (3) desarrollar procesos para la obtención sostenible y limpia de los compuestos y materiales indispensables para las necesidades humanas.

Como plantean con gran claridad George M. Whitesides y John Deutch en su artículo «Let's get practial», publicado en *Nature* en fecha reciente, la estructura que funcionaba para atacar los problemas del siglo pasado no sirve para abordar ninguna de esas cuestiones globales. La división tradicional de la química (orgánica, física, inorgánica y analítica) a la que demasiados investigadores (sobre todo en las universidades) y agencias oficiales se aferran todavía, es completamente obsoleta, limita el campo y la visión, e impide afrontar los problemas actuales. Además, la organización en grupos de investigación aislados es incompatible con el enfoque multidisciplinar que requieren los retos científicos complejos.



Los países punteros en ciencia y tecnología ya están aplicando ese necesario cambio de perspectiva. En EE.UU., dos de las entidades públicas que manejan presupuestos más elevados en investigación, la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF) y el Departamento de Energía (DOE), han emprendido en los últimos años un programa de creación de centros de investigación de un nuevo tipo, concebidos para afrontar los retos que la sociedad impone. Se trata, en muchos casos, de centros «virtuales» en los que participan y colaboran investigadores de distintas instituciones, pero con objetivos y planes de trabajo comunes. Los Centros para la Innovación Química (CCI) de la NSF y los Centros para la Investigación de Frontera en Energía (EFRC) del DOE constituyen un paradigma de esta nueva forma de entender la ciencia. Se definen por el *problema* que tratan, en torno al cual se articula un equipo de trabajo sólido y amplio, integrado por investigadores procedentes de campos muy diversos.

En el Centro para la Estructura y Función de la Lignocelulosa (EFRSC, con un presupuesto de 21 millones de dólares), biólogos moleculares, químicos, físicos, ingenieros y modelizadores abordan cuestiones clave sobre la lignocelulosa que faciliten su uso como fuente de biomateriales y bioenergía renovables. En el Centro para la Innovación Química Energía para el Planeta (CCI Solar, financiado con 12 millones de dólares por la NSF) aplican conocimientos de síntesis orgánica e inorgánica, física y química del estado sólido, electroquímica, cinética, química teórica y computacional al desarrollo de procesos para descomponer el agua mediante luz solar. Un proyecto semejante, con el acento en el desarrollo de catalizadores, se lleva a cabo en el Centro para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías mediante Catálisis (CENTC, de la NSF).

Los genios no se han acabado, pero su talento y su creatividad solo podrán desarrollarse si se dispone de un marco organizativo y estructural que permita su aprovechamiento. Y eso empieza ya en la etapa formativa.

NET-EFEKT/EVERYSTOCKPHOTO

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos

España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA

España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es



BIOQUÍMICA

Flores fluorescentes

La combinación de ciertos pigmentos vegetales genera en las flores patrones de fluorescencia que podrían operar a modo de señal para los polinizadores

Francisco García Carmona, Fernando Gandía Herrero y Josefa Escribano

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON CORTESÍA DE LOS AUTORES

EN SÍNTESIS

Las betalaínas, una familia de pigmentos vegetales, dan color a las flores de plantas del orden de las Cariofilales, que incluye entre otras especies a los cactus.

Si bien son numerosas y muy variadas, las betalaínas presentan solo dos colores en la naturaleza: amarillo y violeta. Las amarillas (betaxantinas) presentan además fluorescencia verde. Las violetas (betacianinas) tienen la capacidad de absorber la luz que emiten las betaxantinas. La presencia de ambos tipos de betalaínas en flores genera patrones de contraste en fluorescencia que podrían atraer a los polinizadores.

Los estudios sobre las betalaínas se han incrementado en los últimos años debido, sobre todo, al interés que ha despertado el descubrimiento de sus propiedades bioactivas, que incluyen la capacidad de retirar radicales libres y de actuar a modo de antioxidantes.

Ciertos polinizadores detectan en las flores de *Portulaca grandiflora* (*derecha*) y *Lampranthus productus* (*izquierda*) una señal invisible para nosotros: la fluorescencia verde que emiten las betaxantinas de los pétalos amarillos.

Francisco García Carmona es catedrático de bioquímica en la Universidad de Murcia. **Josefa Escribano** es profesora titular de bioquímica en la Universidad de Murcia. **Fernando Gandía Herrero** es investigador posdoctoral en el mismo centro. Los autores trabajan desde hace varios años en el estudio de las propiedades de las betalaínas, así como en la implicación de la enzima tirosinasa en su ruta biosintética.



Las tonalidades violáceas y amarillentas que exhiben ciertas flores se deben a la presencia de betalaínas, un grupo de pigmentos vegetales que contienen nitrógeno y son solubles en agua. Se acumulan en flores, frutas y, de forma ocasional, en el tejido vegetativo de plantas de la mayoría de las familias del orden de las Cariofilales. También se hallan presentes en hongos como *Amanita* e *Hygrocybe*. Hasta el momento se han identificado en la naturaleza más de 50 betalaínas, cifra que aumenta constantemente.

Se dividen en dos grupos: las betacianinas, de color violeta, y las betaxantinas, de color amarillo. El ácido betalámico, la unidad estructural básica de estos pigmentos, se encuentra condensado con un aminoácido o amina, en las betaxantinas, y conjugado con *ciclo*-dihidroxifenilalanina (*ciclo*-DOPA) en las betacianinas. Esta molécula puede incorporar azúcares y ácidos a través de uno de los dos grupos hidroxilo presentes en el anillo aromático, con lo que origina dos familias de compuestos: los derivados de la betanina (betanidina-5-*O*-β-glucósido) o de la gomfrenina I (betanidina-6-*O*-β-glucósido).

La presencia de betalaínas en plantas se halla restringida al orden de las Cariofilales, que incluye familias como las Cactáceas o las Nictagináceas. Dentro de este orden solo la pigmentación de las familias de las Cariofiláceas y las Moluginíceas se debe a antocianinas (otro tipo de pigmentos).

Betalaínas y antocianinas no se han hallado nunca juntas en la misma planta. Ello demuestra una divergencia a nivel bioquímico que no se comprende todavía, pero de gran valor taxonómico. La mayoría de las betalaínas naturales deben su nombre a la planta en donde se han descrito, al cual se ha añadido el sufijo «–cianina» (de *kyanos*, «azul» en griego) para las betacianinas, o «–xantina» (de *xanthos*, «amarillo» en griego) para las betaxantinas.

La presencia de betalaínas en flores (*Bougainvillea, Celosia, Gomphrena, Mirabilis, Portulaca*...) reviste interés sobre todo por la importancia del color en esas estructuras. Se han propuesto una gran variedad de funciones para las mismas, inclui-



Las betalaínas que contiene la remolacha roja (*Beta vulgaris*) se utilizan a modo de colorantes en la industria alimentaria.

da la atracción de animales que actuarían a modo de polinizadores y dispersadores de semillas. El ejemplo más conocido de planta superior con estos pigmentos corresponde a la raíz de la remolacha roja (*Beta vulgaris*); sin embargo, estos no desempeñan allí ninguna función visual, sino de regulación osmótica y de almacenaje de compuestos nitrogenados. El descubrimiento de esta actividad biológica arroja luz sobre posibles funciones no relacionadas con la coloración.

Las betalaínas se acumulan en las vacuolas de las células que las sintetizan, sobre todo en los tejidos epidermal y subepidermal. En plantas, otros pigmentos solubles en agua (flavonoides y antocianinas) también se acumulan en la vacuola central; ocupan más del 90 por ciento del total del volumen de la célula y son responsables de la coloración brillante en flores y frutos. En algunos casos, las antocianinas también se han encontrado en el citoplasma.

ANTIOXIDANTES Y COLORANTES

La actividad biológica de las betalaínas ha centrado numerosas investigaciones. En 1998, un estudio en el que participó nuestro grupo puso de manifiesto la capacidad antioxidante de las betalaínas de la remolacha. Posteriormente, varios trabajos confirmaron la elevada actividad antirradical y antioxidante de las betacianinas. Sabemos también que las betalaínas participan en la eliminación del ácido hipocloroso, producto de la enzima mieloperoxidasa implicado en la respuesta inflamatoria.

Se ha demostrado también que dosis reducidas de betanina en la dieta inhiben en ratones la formación de tumores de piel e hígado; en humanos, las concentraciones en plasma tras la ingesta de estos compuestos bastan para promover su incorporación en las lipoproteínas de baja densidad y en glóbulos rojos, a los que protegen del daño oxidativo y la hemólisis.

Las betalaínas, sobre todo en forma de extractos concentrados o liofilizados de raíz de remolacha roja, se utilizan en la industria alimentaria para modificar el color de una amplia variedad de productos. Corresponden a los aditivos denominados E-162. Los encontramos en yogures, cremas o helados, pero también en salchichas y jamón cocido, pasando por galletas, dulces y zumos. Asimismo, se han desarrollado nuevos usos de los frutos comestibles del cactus (*Opuntia ficus indica*, higo chumbo), sobre todo porque evitan el sabor térreo que presentan los extractos de remolacha debido a la presencia de geosminas (compuestos que producen ciertos microorganismos del suelo).

Cuando un compuesto se utiliza a modo de colorante alimentario, la estabilidad de su color constituye uno de los principales factores a tener en cuenta. Las betalaínas se muestran estables a temperaturas inferiores 25 ºC y en condiciones de *p*H entre 3,0 y 7,0. La presencia de oxígeno y luz, en cambio, las desestabilizan. Las betacianinas se ven afectadas de forma negativa por la presencia de enzimas degradativas como las peroxidasas.

PROPIEDADES ÓPTICAS

Las propiedades fisicoquímicas de las betalaínas han sido ampliamente descritas, en especial aquellas relacionadas con su color. Desde los primeros trabajos con estos pigmentos, se han caracterizado los espectros de absorbancia de diferentes especies y el efecto de diversos substituyentes sobre los mismos.

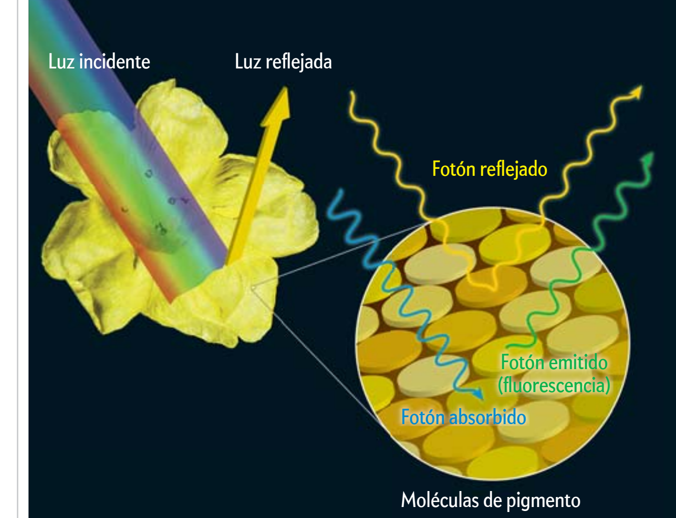
El color actúa en el mundo vegetal como una señal de comunicación entre especies. En general, las plantas se valen de señales visuales para atraer la atención de animales de los que potencialmente pueden aprovecharse para la polinización y la dispersión de las semillas. En estos casos, la coloración más efectiva es la que se muestra en flores y frutos. La que se exhibe en estructuras potencialmente defensivas como las espinas, en cambio, parece transmitir una señal de advertencia dirigida a posibles depredadores. En flores, el color desempeña una función preponderante en la atracción de polinizadores.

La capacidad de los insectos de detectar simetría y asimetría y las preferencias descritas por diseños especiales confieren una relevancia especial a la modulación del color en las flores y, por tanto, a la regulación de la biosíntesis y a las propiedades ópticas de los pigmentos que lo provocan.

A pesar de los numerosos estudios realizados acerca de las betalaínas, hasta hace poco no se conocían las propiedades fluorescentes de las betaxantinas. En 2005 descubrimos en nuestro laboratorio un curioso patrón de fluorescencia debido a la combinación de dos de estos pigmentos. Para este estudio determinamos las propiedades fisicoquímicas de varios de estos compuestos.

Todas las especies analizadas presentan un comportamiento similar: con máximos de excitación comprendidos entre 463 y 475 nanómetros y máximos de emisión de entre 506 y 515 nanómetros. Es decir, las betaxantinas absorben luz en el rango visible del espectro electromagnético correspondiente al color azul y emiten luz verde. Los espectros de excitación y emisión son muy similares en todos los casos y análogos al descrito para la betaxantina más sencilla considerada, la alanina-betaxantina. La separación entre la longitud de onda máxima de excitación y la máxima de emisión (desplazamiento de Stokes), y la anchura de los

El color de las flores



Los pigmentos son moléculas que, por su estructura química, absorben luz de una determinada longitud de onda y reflejan el resto, que define el color que nosotros percibimos. El cromóforo, la parte de la molécula responsable del color, suele contener una cadena de dobles enlaces conjugados; fruto de esta interacción, los dobles enlaces generan un sistema «resonante» con estados electrónicos cuya separación energética coincide con la energía de ciertos fotones del rango visible de la luz; esos son los fotones que absorbe el pigmento. En algunos pigmentos, la exposición a la luz provoca, además, la emisión de nuevos fotones; hablamos entonces de fluorescencia.

Los pigmentos vegetales que centran este artículo, las betalaínas, se dividen en dos grupos: las betacianinas, de color violeta (porque absorben luz verde) y las betaxantinas, de color amarillo (porque absorben luz azul). Tienen en común una unidad básica estructural y funcional, el ácido betalámico: en las betaxantinas, se encuentra condensado con un aminoácido o amina; en las betacianinas, conjugado con una *ciclo*- dihidroxifenilalanina (*ciclo*-DOPA). El sistema de dobles enlaces conjugados del ácido betalámico (*amarillo*) es el responsable del color de estos pigmentos.

ACIDO BETALÁMICO

BETAXANTINAS

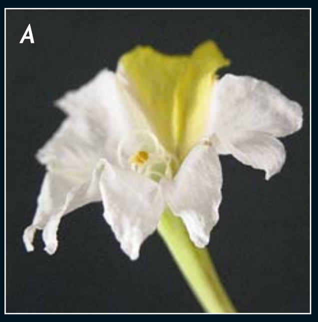
Absorben luz de entre 463 y 475 nm (*azul*)

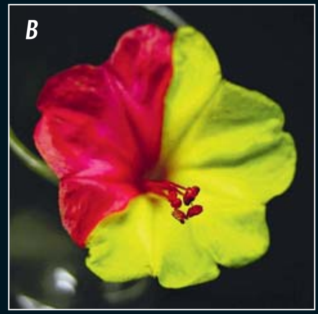
Emiten luz fluorescente de entre 506 y 515 nm (*verde*)

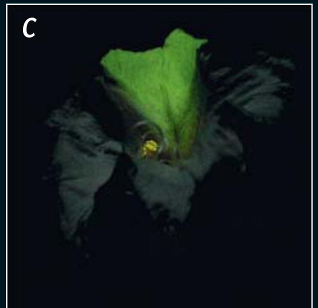
BETANIDINA (BETACIANINA)

Absorben luz de entre 480 y 540 nm (*verde*)

No muestran fluorescencia









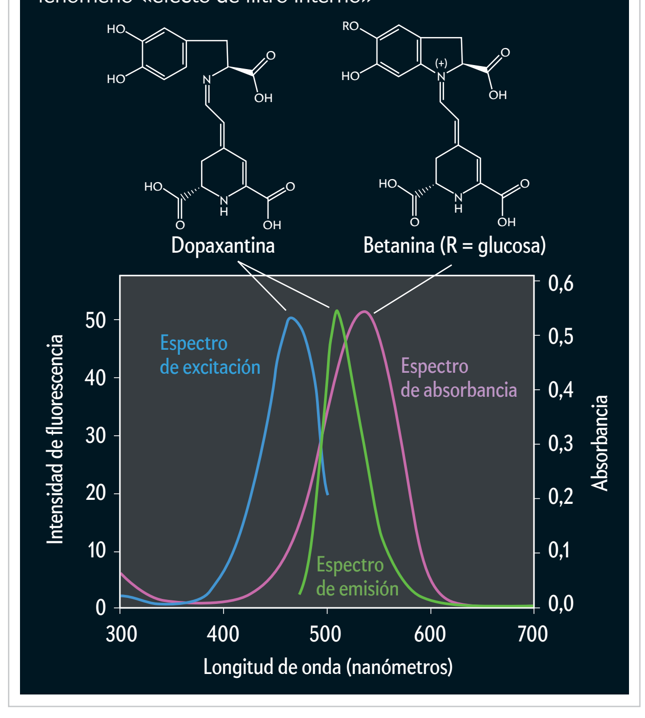
Flores con luz propia

Además de poseer color, las betaxantinas muestran también fluorescencia: al ser expuestas a la luz, emiten radiación de una longitud de onda superior a la incidente. La intensidad de esta fluorescencia depende del carácter «dador» o «aceptor» electrónico del sustituyente (R) del grupo amina o aminoácido que se halla unido al ácido betalámico. Cuanto mayor sea su carácter aceptor, cuanta más densidad electrónica «absorba» del sistema resonante, más intensa será la fluorescencia de la betaxantina. Las betacianinas, en cambio, no presentan fluorescencia. Ello se debe a la conexión que se produce entre los dos sistemas resonantes: el del ácido betalámico (*amarillo*) y el del anillo aromático del *ciclo*-DOPA (*verde*)

Las fotografías muestran la fluorescencia visible en flores de *Mirabilis jalapa*. Cuando se ilumina con luz blanca (*A* y *B*), las áreas de las flores que contienen solo betaxantinas parecen amarillas debido a la combinación de fluorescencia y la radiación no absorbida, o reflejada. Cuando se ilumina con luz azul (*C* y *D*), las betaxantinas emiten fluorescencia verde.

Filtro interno

Numerosas plantas del orden de las Cariofilales poseen variedades con flores amarillas, violetas y rojas, con betaxantinas, betacianinas y una mezcla de los dos pigmentos. Entre los casos más llamativos se encuentra *Mirabilis jalapa*, que puede presentar flores con patrones de colores variados dentro de la misma planta. Los autores han descubierto que esta planta exhibe además patrones de contraste de fluorescencia que podrían resultar atractivos para los polinizadores. El patrón resulta del solapamiento entre el espectro de emisión de las betaxantinas (*verde*) y el de absorción de las betacianinas (*violeta*). Dado que la fluorescencia visible que emiten las betaxantinas es absorbida por las betacianinas, se denomina a este fenómeno «efecto de filtro interno»



espectros (medida a un valor de intensidad mitad del máximo) son también semejantes. Tantas semejanzas apuntan a que el motivo común en la estructura de las betaxantinas, al ácido betalámico, está implicado en el fenómeno de la fluorescencia. Esta estructura básica es además la responsable del color de los pigmentos, debido a su sistema de dobles enlaces conjugados.

Parece que la naturaleza del grupo amina o aminoácido que en las betaxantinas se halla conjugado con el ácido betalámico apenas contribuye a las características espectrales de la molécula. No se han observado diferencias notables al variar la longitud de la cadena del residuo o su polaridad; asimismo, las betaxantinas derivadas de la leucina y el ácido glutámico muestran máximos de absorción e intensidades relativas similares.

Sin embargo, sí existe un factor que modifica la intensidad de la fluorescencia: el carácter «dador» o «aceptor» electrónico del sustituyente del grupo amina o aminoácido. Cuanto mayor sea su carácter aceptor, cuanta más densidad electrónica «absorba» del sistema resonante (la cadena de dobles enlaces conjugados), más intensa será la fluorescencia de la betaxantina. En general, un grupo será más «absorbente» de carga eléctrica cuanto más oxidado se halle. Ello explica que el pigmento derivado del sulfóxido de metionina presente mayor fluorescencia que el derivado de metionina, y que el pigmento derivado del ácido glutámico (con un grupo carboxilo) refuerce su fluorescencia respecto del análogo derivado de la glutamina. Por la misma razón, las betaxantinas aromáticas derivadas de difenoles (grupos «dadores» de densidad electrónica) presentan intensidades inferiores a las derivadas de los monofenoles.

FLUORESCENCIA VEGETAL

A partir de los espectros de fluorescencia de las betaxantinas hemos desarrollado un método para la detección de estos pigmentos vegetales. Primero se separan mediante cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC, por sus siglas en inglés). Y luego, sin necesidad de transformarlas en derivados (derivatización), se detectan e identifican mediante un detector de fluorescencia. Todas las betaxantinas estudiadas pueden detectarse con excitación a 460 nanómetros y seguimiento de la emisión a 510 nanómetros.

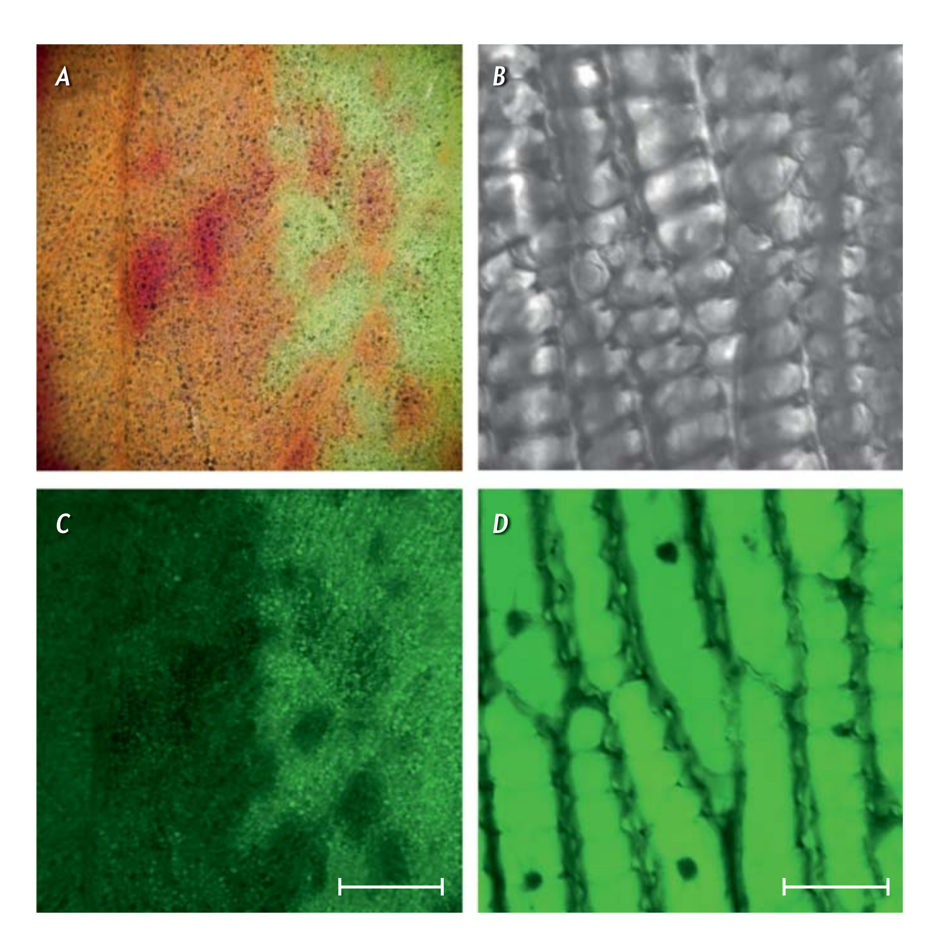
Mediante ese método hemos determinado los pigmentos naturales extraídos de flores de las plantas *Mirabilis jalapa* y *Carpobrotus acinaciformis*. En el primer caso, el análisis permitió determinar, por primera vez, la presencia de trazas de betaxantinas (derivadas de dopamina y tiramina) en flores blancas. En el segundo, se describió la presencia de los pigmentos derivados de glutamina, ácido glutámico y tirosina en las flores amarillas.

La misma fluorescencia visible descrita para las betaxantinas individuales (sintetizadas) se detecta en extractos de flores amarillas que contienen betaxantinas. Puesto que la emisión de luz aparece en disoluciones acuosas, se planteó la posibilidad de que esta pudiera hallarse implicada en un fenómeno de fluorescencia a nivel de las estructuras vegetales (vacuolas) que las contienen en las plantas, puesto que allí el entorno es también acuoso. Como modelo de estudio se han elegido las flores, debido a la importancia de las señales visuales como un elemento de atracción para los animales polinizadores.

Para apreciar la fluorescencia específica de las betaxantinas se utiliza un sistema de filtros. Uno limita las longitudes de onda para la excitación de los pigmentos de la muestra; otro filtra la luz residual reflejada por la misma. Así, se ha demostrado que la emisión de luz visible por parte de las betaxantinas se mantiene en su entorno fisiológico y que las flores que las contienen pueden considerarse elementos fluorescentes. Mediante microscopía de fluorescencia pueden observarse las células que contienen los pigmentos, excitándolos apropiadamente mediante sistemas de filtros o con el haz de luz coherente de un láser.

El trabajo descrito ha abierto nuevas vías para el estudio de las relaciones entre animales y plantas, puesto que hasta entonces no se había considerado la posibilidad de que la emisión de luz por parte de flores operara a modo de señal. Sin embargo, parece que la fluorescencia podría desempeñar una función fisiológica notable.

Los agentes polinizadores presentan sensibilidades distintas y perciben los colores de diferentes formas. Se ha descubierto un murciélago polinizador de plantas de las Cactáceas que tiene la capacidad de ver con un único receptor con una longitud de onda máxima de 510 nanómetros, precisamente la longitud de onda a la que emiten las betaxantinas. Por otro lado, las abejas, que polinizan numerosas plantas y han sido tomadas como modelo en el estudio de la visión animal y la po-



Imágenes microscópicas de campo claro (*A*) y epifluorescencia (*C*) de una sección de un pétalo rojo y amarillo de *Mirabilis jalapa*. La fluorescencia verde se debe a las betaxantinas; en las áreas oscuras (*naranjas en A*), la luz emitida por el pigmento fluorescente es absorbida por betanina. Imágenes de microscopía confocal por transmisión (*B*) y fluorescencia (*D*) de pétalos amarillos de *Portulaca grandiflora*. Muestran también la fluorescencia debida a las betaxantinas. (Escala en *A* y *C*: 500 micrómetros; en *B* y *D*: 40 micrómetros.)

linización, poseen también un receptor para la luz verde; asimismo, se ha demostrado que son capaces de percibir con mayor eficacia los objetos que brillan. La importancia fisiológica de la fluorescencia se ha constatado también en loros, donde la presencia de plumas fluorescentes se ha relacionado con un mayor éxito en el apareamiento.

CREACIONES CROMÁTICAS

La forma en que las flores exhiben su coloración resulta crucial para la atracción de polinizadores. La capacidad de los insectos para detectar los patrones cromáticos confiere una especial relevancia a la modulación de los factores visuales en las flores. En nuestro laboratorio hemos descrito un efecto de filtro interno en las flores de *Mirabilis jalapa*: en esta, la fluorescencia visible emitida por las betaxantinas es absorbida por las betacianinas, creando en los pétalos un patrón de contraste de fluorescencia.

Los pigmentos violetas análogos de las betaxantinas y compañeros en la coloración de plantas del orden de las Cariofilales, las betacianinas, no presentan fluorescencia. La unidad estructural de estos pigmentos, la betanidina, puede considerarse un derivado del ácido betalámico, que contiene la estructura cerrada del *ciclo*-DOPA. En ella se observa una peculiaridad ausente en las betaxantinas. Nos referimos a la conexión entre dos sistemas resonantes (sistemas con dobles enlaces conjugados): el ácido betalámico y el anillo aromático del *ciclo*-DOPA. Esta ampliación del sistema resonante es la responsable del desplazamiento del máximo del espectro de absorbancia de 480 a 540 nanómetros; asimismo, también parece ser la responsable de la ausencia de fluorescencia en los pigmentos violetas.

Por otro lado, se observa un solapamiento entre el espectro de emisión de las betaxantinas y el de absorción de las betacianinas. Este fenómeno puede provocar en un sistema que contenga un fluoróforo (estructura responsable de la fluorescencia) y un cromóforo (estructura responsable del color) la atenuación de la fluorescencia, si el cromóforo es capaz de absorber la radiación emitida por el compuesto fluorescente. Nos referimos al «efecto de filtro interno». La adición progresiva de una betacianina a una disolución de betaxantina provoca la extinción, por este efecto, de la fluorescencia. Ello demuestra que las betacianinas absorben la radiación emitida por las betaxantinas.

Son muchas las plantas del orden de las Cariofilales que poseen variedades con flores amarillas, violetas y rojas, con betaxantinas, betacianinas y una mezcla de los dos pigmentos. Entre los casos más llamativos se encuentra *Mirabilis jalapa*, que puede presentar flores con patrones de colores variados dentro de la misma planta. En este caso, zonas que contiene solo betaxantinas se encuentran junto a otras que contienen también betacianinas. Al filtrar la radiación de excitación y la luz emitida se observa que el efecto de filtro interno descrito en disolución se mantiene en el entorno fisiológico: las flores presentan patrones fluorescentes de contraste. La interferencia de la fluorescencia puede apreciarse tanto en imágenes completas de las flores como a través de microscopía de fluorescencia.

Se ha observado que los patrones cromáticos de contraste resultan atractivos para los polinizadores; incluso los depredadores de insectos son capaces de manipularlos en su estrategia de caza. La importancia del color y de los patrones formados por su distribución en las flores como factores determinantes en la atracción de polinizadores, a los que ahora pueden sumarse la fluorescencia y sus correspondientes patrones, confiere una especial relevancia a la regulación de la ruta biosintética de los pigmentos que los originan.

¿Cómo fabrican las plantas las betalaínas?

La ruta biosintética de las betalaínas parte del aminoácido tirosina (*azul*), que se incorpora completamente a la unidad estructural de estos pigmentos, el ácido betalámico (*amarillo*). En las betalaínas violetas (betacianinas), se incorpora además una segunda unidad de tirosina. Solo dos enzimas controlan la formación de esta familia de pigmentos: la dioxigenasa y la tirosinasa; una tercera, la glucosiltransferasa, cataliza la formación de los derivados de las betacianinas. La condensación de ácido betalámico con aminoácidos y aminas es espontánea, lo que genera una gran variedad de estructuras.

BIOSÍNTESIS DE LAS BETALAÍNAS

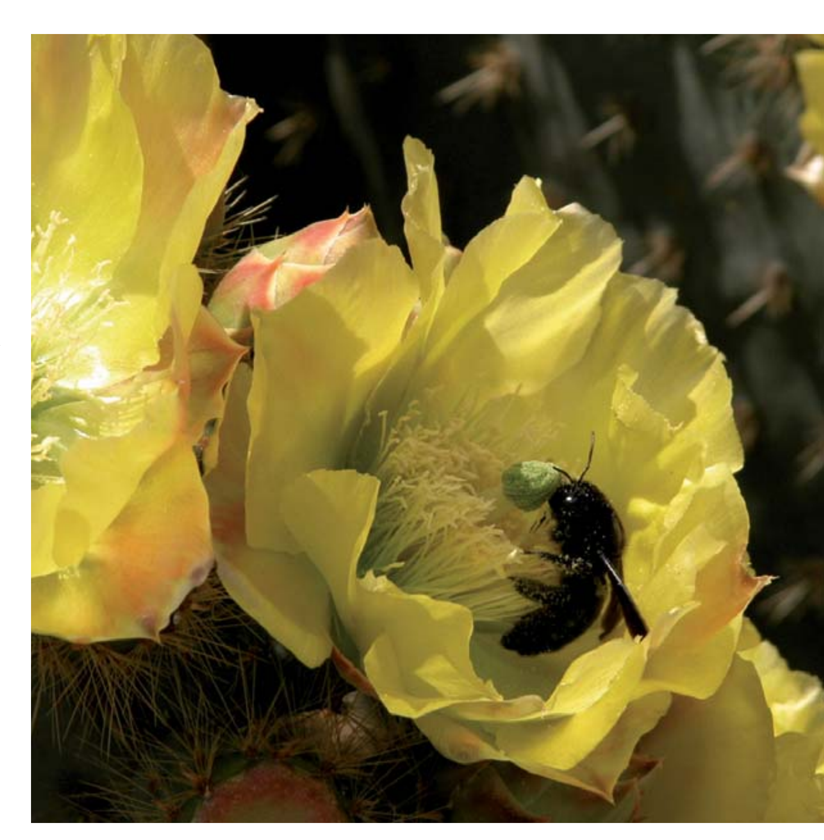
A diferencia de lo que ocurre con otras familias de pigmentos vegetales, como los carotenoides, las antocianinas o las clorofilas, la ruta biosintética de las betalaínas no se conoce todavía con detalle.

Una vez conocida la estructura química de las betalaínas y de algunos de los intermedios biosintéticos, se propuso una primera versión de la ruta biosintética. Las reacciones iniciales fueron elucidadas mediante experimentos de marcaje isotópico con tirosina y DOPA. Se demostró que el esqueleto completo de tirosina era incorporado al ácido betalámico y *ciclo*-DOPA. Tres enzimas fundamentales participan en esta síntesis: tirosinasa, DOPA 4,5-dioxigenasa y betanidina glucosiltransferasa.

La enzima tirosinasa, o polifenol oxidasa, desempeña una función clave. Se ha descrito y purificado a partir de extractos que contenían betalaínas en *Amanita muscaria*, *Portulaca grandiflora* y remolacha roja. Se encuentra ampliamente distribuida en toda la escala filogenética. Se trata de una cupoproteína que cataliza dos tipos de reacciones acopladas a expensas de oxígeno molecular: la hidroxilación de monofenoles en posición *orto* para dar el correspondiente *o*-difenol (actividad monofenolasa) y la oxidación de *o*-difenoles a sus correspondientes *o*-quinonas (actividad difenolasa).

La variedad de posibles substratos y la elevada reactividad de las *o*-quinonas generadas por la tirosinasa determinan la participación de esta enzima en procesos fisiológicos de formación de polímeros tan diversos como la biosíntesis de ligninas, la esclerotización de la cutícula de artrópodos y la formación de las melaninas responsables de la pigmentación en animales.

Ciertos polinizadores (algunos murciélagos e insectos) poseen receptores visuales específicos para la luz verde que las betaxantinas emiten por fluorescencia. Dado que estos animales muestran una especial atracción por elementos brillantes y determinados patrones cromáticos, la fluorescencia de las betalaínas podría desempeñar una función importante en la polinización de plantas. En la imagen, una especie de *Opuntia*.



El primer paso de la biosíntesis de las betalaínas corresponde a la hidroxilación, mediada por la tirosinasa, de tirosina a DOPA (3,4-dihidroxifenilalanina). Tras sufrir oxidaciones y ciclaciones espontáneas, se transforma en ácido betalámico, el cromóforo esencial de todas las betalaínas. Otra rama de esta ruta (que parte también de la hidroxilación de la tirosina) conduce a la molécula *ciclo*-DOPA (leuko-DOPA-cromo), que, puede reaccionar con una molécula de ácido betalámico por condensación para formar betanidina, la unidad estructural de la mayoría de las betacianinas (*véase el recuadro* «¿Cómo fabrican las plantas las betalaínas?»).

Hasta el año 2005, el esquema biosintético establecido para las betalaínas no contemplaba la existencia de actividades enzimáticas de la tirosinasa sobre betaxantinas, ni la formación final de pigmentos por otro medio distinto al de la condensación del ácido betalámico con aminas, aminoácidos o *ciclo*-DOPA. Sabemos ahora que existe cierta actividad de la tirosinasa sobre dopaxantina y dopamina-betaxantina, cuyos productos derivados corresponden a formas «leuko» generadas por ciclación intramolecular de las correspondientes quinonas, análogas a la betanidina y a la 2-descarboxi-betanidina.

En la actividad difenolasa sobre betaxantinas, se observa que la dopamina-betaxantina es mejor substrato (presenta mayor afinidad) que la dopaxantina. En el caso de la dopaxantina, la presencia del ácido betalámico en la molécula duplica la afinidad respecto a la DOPA libre; para el pigmento derivado de dopamina, la afinidad es cinco veces mayor que para la catecolamina.

Los pigmentos tiramina-betaxantina y tirosina-betaxantina tienen estructuras monofenólicas apropiados para ser substratos de la actividad monofenolasa de la tirosinasa. La actividad sobre estos compuestos resulta en la formación de los mismos productos obtenidos para las betaxantinas difenólicas correspondientes. Ello está en consonancia con el mecanismo de acción de la enzima, según el cual, la *o*-quinona formada es la misma y, por consiguiente, la evolución experimentada hacia las formas «leuko» bajo las mismas condiciones también lo es.

La presencia en el medio de reacción de un agente reductor como el ácido ascórbico hace que la *o*-quinona se transforme en el *o*-difenol del que proviene, sin ningún efecto sobre las formas «leuko» ya cicladas. De este modo, si se encuentra presente ácido ascórbico en el medio durante la reacción, lo que se observa es la conversión del monofenol en el difenol.

La conversión de tirosina-betaxantina en dopaxantina y de tiramina-betaxantina en dopamina-betaxantina provoca muy pocos cambios a nivel espectral, dada la similitud de sus propiedades ópticas. Sin embargo, a través del análisis por HPLC puede verse cómo en presencia de ácido ascórbico se obtiene el difenol, que es estable y se acumula en el medio, a la vez que desaparece el substrato monofenólico. Una vez que el ácido ascórbico se agota por su acción continuada sobre las quinonas generadas por la enzima, el difenol desaparece y se forman los correspondientes productos de reacción ya comentados para la actividad en ausencia de ácido ascórbico.

El establecimiento de la capacidad de la tirosinasa para hidroxilar la tirosina-betaxantina a dopaxantina y su posterior oxidación a dopaxantina-quinona permite proponer un mecanismo alternativo para la biosíntesis de las betalaínas. En ausencia de agentes reductores en el medio, la quinona evolucionaría de forma no enzimática hacia especies más estables, como betanidina, en línea con la evolución seguida por la *o*-DOPA-quinona libre. Considerando las dos actividades de tirosinasa sobre betaxantinas, la tirosina sería el aminoácido de partida para la condensación con el ácido betalámico. Ello concuerda con la acumulación de tirosina, y no de DOPA, en los momentos previos a la formación de betacianinas en flores violetas de *Portulaca* y a su evolución sincronizada.

Bajo la perspectiva del nuevo esquema propuesto para la biosíntesis de betalaínas, la tirosinasa puede considerarse la enzima decisiva en el cambio de color de amarillo a violeta en las estructuras coloreadas de plantas del orden de las Cariofilales y, por extensión, en la modulación de la fluorescencia visible.

PARA SABER MÁS

Floral fluorescence effect. F. Gandía-Herrero, F. García-Carmona, J. Escribano en *Nature*, vol. 437, pág. 334, 2005.

Betaxanthins as substrates for tyrosinase. An approach to the role of tyrosinase in the biosynthetic pathway of betalains. F. Gandía-Herrero, J. Escribano y F. García-Carmona en *Plant Physiology*, vol. 138, págs. 421-432, 2005.

Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. Y. Tanaka, N. Sasaki y A. Ohmiya en *The Plant Journal*, vol. 54, págs. 733-749, 2008.

Fluorescence detection of tyrosinase activity on dopamine-betaxanthin purified from *Portulaca oleracea* (common purslane) flowers. F. Gandía-Herrero, M. Jiménez-Atiénzar, J. Cabanes, J. Escribano y F. García-Carmona en *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 57, págs. 2523-2528, 2009.

Structural implications on color, fluorescence, and antiradical activity in betalains. F. Gandía-Herrero, J. Escribano y F. García-Carmona en *Planta*, vol. 232, n.º 2, págs. 449-460, 2010.



Investigadores de la Universidad de California en Berkeley utilizaron los CubeSat en un proyecto sobre iones, partículas neutras, electrones y campos magnéticos.

ESPACIO

Satélites para todos

Diminutas cápsulas espaciales ponen la experimentación en órbita al alcance de los grupos de investigación más modestos

Alex Soojung-Kim Pang y Bob Twiggs

Alex Soojung-Kim Pang es doctor en historia de la ciencia por la Universidad de Pennsylvania. Ha publicado sobre la historia de la astronomía, el trabajo de campo científico y el impacto social de las nuevas tecnologías. Pertenece a la Escuela de Negocios Saïd de la Universidad de Oxford y actualmente es profesor visitante en el Centro de Investigación de Microsoft en Cambridge.



Bob Twiggs se graduó en ingeniería eléctrica en la Universidad de Idaho y cuenta con un máster en la misma disciplina por la Universidad de Stanford. Participó en el desarrollo de los CubeSat cuando trabajaba en el departamento de aeronáutica y astronáutica de la Universidad de Stanford. Desde 2009 es profesor de la Universidad estatal Morehead en Kentucky.



Desde que el *Sputnik* inaugurase la era espacial, hace ya más de cincuenta años, el cielo ha pertenecido a las grandes instituciones. Los miles de satélites lanzados desde entonces han sido casi siempre el fruto de vastos proyectos financiados por gobiernos y corporaciones. Las sucesivas generaciones de naves espaciales se han ido complicando y encareciendo a lo largo de las últimas décadas. Su diseño ha llevado cada vez más tiempo y han exigido una costosa infraestructura de lanzamiento, complejas estaciones de seguimiento, especialistas y centros de investigación.

En los últimos años, sin embargo, los avances en electrónica, energía solar y otras áreas han logrado reducir el tamaño de los satélites hasta un grado inconcebible. Los CubeSat, un nuevo tipo de satélites, han permitido simplificar y tipificar el diseño de cápsulas espaciales diminutas. Los gastos de desarrollo, lanzamiento y operación de uno de ellos no superan los 100.000 dólares; una fracción mínima del presupuesto de cualquier misión de la NASA o de la Agencia Espacial Europea.

Un CubeSat abulta poco más que un cubo de Rubik. Fue concebido para que los diseñadores se beneficiasen de unas especificaciones estándar de tamaño y peso que les permitiesen combinar varios satélites (cada uno preparado por un grupo diferente) en una sola carga útil. Esta suele ser transportada por otras misiones con espacio libre a bordo; los elevados costes del lanzamiento se reparten entre todos los participantes. El diseño tipificado de los CubeSat permite adquirir los componentes ya listos y favorece el intercambio de experiencias.

Desde la aparición de los CubeSat, se han lanzado al menos dos docenas de ellos desde EE.UU., Asia, Europa e Iberoamérica. Sus tareas abarcan desde la investigación biomédica en condiciones de microgravedad hasta estudios de las capas altas de la atmósfera. Su reducido coste, el breve tiempo que requiere su fabricación, su uso generalizado y su valor educativo han hecho de los CubeSat un instrumento cada vez más habitual. Numerosos grupos universitarios de todo el mundo (en muchos casos, compuestos por alumnos de grado y doctorado) ya tienen acceso a ellos; países pequeños, empresas en ciernes e incluso alumnos de instituto ya desarrollan sus propios programas espaciales. Dentro de poco, los costes de lanzamiento podrían reducirse hasta los 10.000 dólares; ello bastaría para que entrasen en liza grupos de aficionados. Creemos posible que, en el ámbito espacial, los CubeSat acaben desempeñando una función semejante a la que tuvo el Apple II en el campo de la computación hace treinta años: desencadenar una revolución que ponga al alcance de casi todo el mundo una tecnología antes inaccesible.

El nacimiento de una idea

Los inicios de la era espacial ya conocieron satélites ligeros. El *Sputnik 1*, por ejemplo, apenas pasaba de los 80 kilogramos. Sin embargo, a medida que aumentaba la potencia de los cohetes, los satélites se tornaron mayores y más complejos. En la actualidad, los grandes artilugios de comunicaciones e investigación llegan a pesar varias toneladas.

Mientras tanto, los «microsatélites» (cápsulas espaciales de entre 10 y 100 kilogramos) quedaron relegados a un papel secundario, si bien nunca desaparecieron del todo. Entre otros objetivos, se usaron para explorar la termosfera, la capa de la atmósfera que se extiende entre los 80 y los 100 kilómetros de altitud. También, desde principios de los años sesenta, los pequeños satélites de comunicaciones OSCAR (del inglés para Satélite Orbital con Equipo de Radioaficionado) han prestado servicio a radioaficionados de todo el mundo.

Los años ochenta conocieron un mayor interés por los satélites de tamaño reducido. Ello se debió a los procesos de miniaturización electrónica y al desarrollo de microsistemas electromecánicos, como los diminutos acelerómetros que hoy incluyen iPhones o airbags. A finales de los noventa ya parecía posible fabricar satélites cuyo peso no excediese el kilogramo, algo que reduciría de manera drástica los gastos de desarrollo y lanzamiento. Además, la NASA había alentado a sus ingenieros para que presentasen propuestas que abaratasen las misiones espaciales. Fue en aquella época cuando uno de los autores (Twiggs, por entonces en el Laboratorio de Desarrollo de Sistemas y del Espacio de la Universidad de Stanford) y Jordi Puig Suari, profesor en la Universidad Politécnica del Estado de California en San Luis Obispo, llegaron a la conclusión de que, para que realmente funcionase, el concepto de microsatélite exigía cierta normalización. Un ejemplo en el ámbito informático lo supuso la

EN SÍNTESIS

El empleo de cierto tipo de satélites tipificados, los CubeSat, ha reducido el coste de numerosas misiones espaciales y las ha hecho más accesibles que nunca.

Los CubeSat ocupan un litro, su peso no excede el kilogramo y se construyen con componentes comunes. Un modelo puede estar acabado en tan solo uno o dos años.

Otras misiones con espacio libre a bordo los ponen en órbita. La mayoría caen a tierra tras un tiempo breve, por lo que no contribuyen a la acumulación de basura orbital.

Universidades, empresas e incluso aficionados pueden emprender misiones científicas en campos que van desde la física atmosférica hasta experimentos en microgravedad.

FOTOGRAFÍA DE SPENCER LOWELL

popularización del código abierto, la cual abarató los programas informáticos en todo el mundo.

Ambos ingenieros publicaron en el año 2000 las especificaciones de CubeSat. Un documento de diez páginas establecía una serie de requisitos: cada unidad habría de constar de un cubo de 10 centímetros de arista (con una precisión de una décima de milímetro); es decir, de un litro de volumen. Además, su peso no debería exceder el kilogramo. Los CubeSat también pueden ser rectangulares, con una unidad del tamaño de dos o tres cajas cúbicas (los llamados CubeSat 2U o 3U).

Un CubeSat consiste en un armazón metálico que encierra y protege los componentes electrónicos, los instrumentos y los sistemas de energía y comunicaciones. Suelen contar con paneles solares en varias caras y con una antena en un extremo. Algunos pronto dispondrán de sistemas de navegación rudimentarios, provistos de toberas para estabilizar la cápsula y orientarla en la dirección deseada.

Al constar de módulos, resulta posible encajarlos en armazones tipificados que contengan varias unidades, las cuales son expulsadas una vez que el cohete se encuentra en órbita. En 2003, Puig presentó el diseño para un dispositivo de ese estilo. Ello abrió las puertas a que los CubeSat pudiesen viajar en los cohetes de las agencias espaciales de EE.UU. y Rusia. Ese mismo año, la compañía Pumpkin fabricó el primer CubeSat comercial. En él, algunos componentes (como la placa madre de los circuitos electrónicos, el armazón metálico, la batería y los paneles solares) ya venían listos para su uso, de modo que el dispositivo fuese apto para científicos con escasa o ninguna experiencia en misiones espaciales.

El interior de los CubeSat es tan variado como lo son sus constructores. Al abrir uno de ellos aparece una mezcla de equipos aeroespaciales y tecnología comercial; instrumentos científicos personalizados, piezas recuperadas de misiones anteriores, equipos de radio adquiridos en el comercio local o material informático tomado de ordenadores personales o comprado en eBay.

Desde el principio, cada usuario de los CubeSat se ha apoyado en la experiencia de los demás, en sus éxitos y sus trucos. Los neófitos pronto aprenden a compartir todo salvo la carga útil. Cuando alguien desarrolla una novedad (por ejemplo, un equipo de radioaficionado que opera durante más tiempo que otros), comparte sus descubrimientos con otros diseñadores de CubeSat.

Muy pronto, descubrimos que los estudiantes también se interesaban por los CubeSat y que podían aprender mucho de ellos. En los programas de ingeniería espacial tradicionales, los alumnos trabajan en proyectos teóricos o en el diseño de piezas para grandes proyectos que se lanzan al espacio años después de haberse graduado. Por el contrario, un CubeSat puede construirlo un grupo en un solo laboratorio. Un satélite operativo puede estar terminado al cabo de uno o dos años, por lo que constituye un tema ideal para proyectos de tesis. Los estudiantes se convierten en responsables directos de los proyectos CubeSat: aun antes de graduarse ya pueden dirigir proyectos o especializarse en ciertas misiones. La posibilidad de ver su equipo lanzado al espacio supone un gran aliciente. Para los educadores, los CubeSat permiten exponer todas las facetas de la ingeniería de satélites de gran tamaño, con lo que pueden ofrecer a los estudiantes una visión global y profunda del diseño de un satélite.

CIENCIA CÚBICA

En los últimos años, el abanico de científicos e instituciones que experimentan con los CubeSat se ha diversificado en gran medida. A astrofísicos e ingenieros aeroespaciales se han unido profesores y alumnos de otras disciplinas, así como compañías que ofrecen servicios y asistencia para el lanzamiento. Países que apenas contaban con programas espaciales, como Suiza y Colombia, han puesto en órbita sus primeros CubeSat; otros, como Estonia, ya trabajan en el suyo propio. En EE.UU., estados como Kentucky han creado un consorcio de instituciones académicas y entidades sin ánimo de lucro para poner en marcha una industria de CubeSat.

Desde el principio, cada usuario de los CubeSat se ha apoyado en la experiencia de los demás, en sus éxitos y sus trucos

La vanguardia tecnológica ha evolucionado desde las primeras misiones, orientadas a fines educativos (denominadas «BeepSat», ya que apenas hacían algo más que transmitir señales de radio para demostrar su estado operativo hasta objetivos científicos de mayor enjundia. Según Jason Crusan, de la NASA, la comunidad CubeSat puede aspirar ahora a una buena cantidad de misiones con resultados significativos.

Los CubeSat han encontrado aplicaciones en numerosos campos, algunos controvertidos o muy experimentales. El QuakeSat, lanzado en 2003, pertenecía a un programa para mejorar la predicción de temblores sísmicos a partir de la detección de las variaciones del campo magnético de frecuencia extremadamente baja (ELF, por sus siglas en inglés). Funcionó durante varios meses y envió datos a la estación de Stanford, si bien la mayoría de los sismólogos recelan de un vínculo causal entre las ELF y los terremotos, y de la fiabilidad de las mediciones de las ELF desde el espacio. Otro ejemplo lo constituye el LightSail-1, un CubeSat 3U de la Sociedad Planetaria para ensayar la primera vela solar del mundo, una técnica que quizá se convierta en un modelo de propulsión viable dentro del sistema solar.

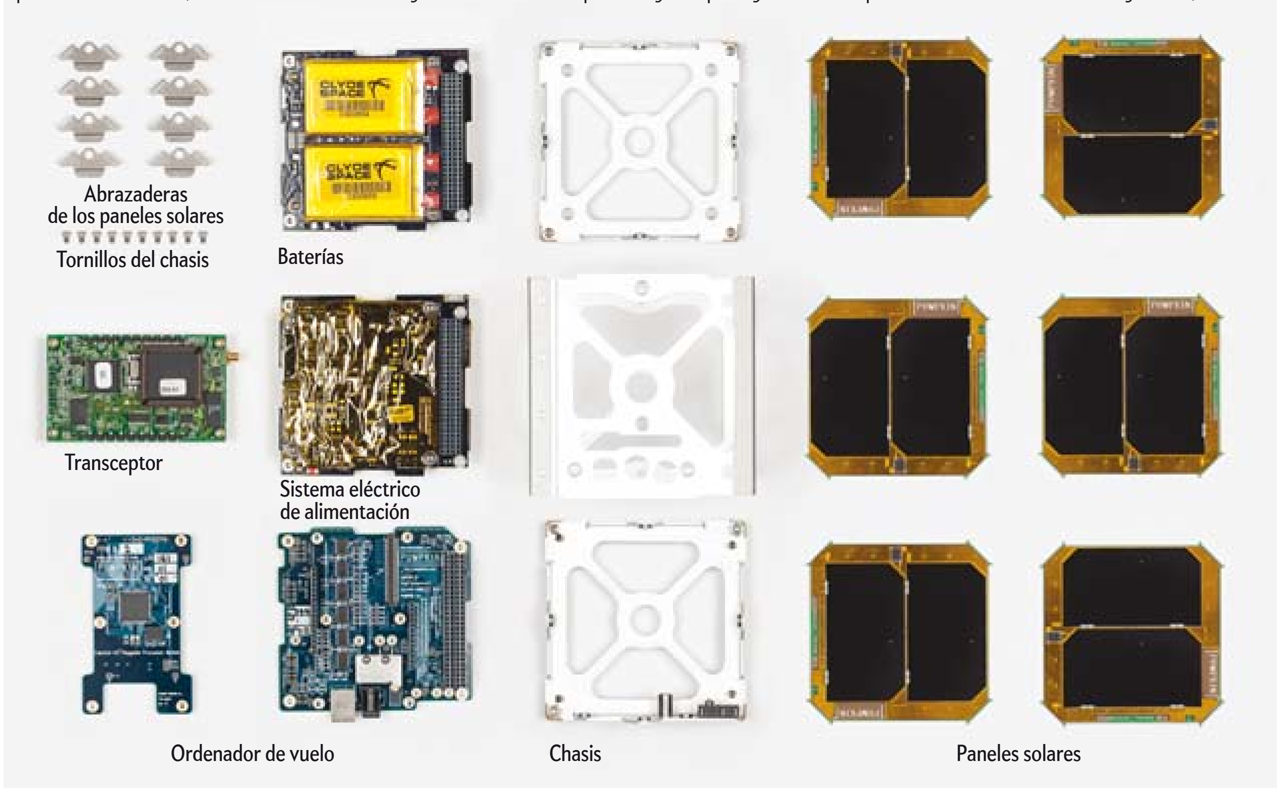
También la NASA, las agencias de inteligencia y el Ejército han comenzado a experimentar con los CubeSat. El cambio de opinión es notable: hace pocos años, los expertos creían que los CubeSat nunca alcanzarían la fiabilidad necesaria, que no podrían ser controlados con precisión y que, al final, solo acumularían más basura espacial en órbitas bajas muy apreciadas. A pesar de las sucesivas mejoras técnicas, las organizaciones habituadas a invertir cientos de millones de dólares y miles de personas al año en el desarrollo de satélites gigantescos no confiaban en las prestaciones de un satélite de fabricación rápida y del tamaño de una caja de zapatos.

El programa Colony 1, de la Oficina Nacional de Reconocimiento estadounidense, utiliza los CubeSat para ensayar en vuelo sus innovaciones técnicas antes de incorporarlas a naves de mayor porte. Otros científicos se valen de los CubeSat para investigaciones farmacéuticas más tradicionales. La Oficina de Cápsulas Espaciales Pequeñas, radicada en el Centro de Investigación Ames de la NASA, en Silicon Valley, lanzó dos CubeSat en 2006 y 2007. Pretendían, respectivamente, comprobar si los dispositivos conocidos como «laboratorios en microchips» operarían de manera correcta en una órbita terrestre baja, y determinar la viabilidad de efectuar experimentos biológicos a bajo coste en condiciones de microgravedad. Tres años después, el grupo demostró la eficacia de fármacos antibacterianos en condiciones de microgravedad, un primer paso en la farmacología destinada a misiones espaciales tripuladas de larga duración. En 2010, la empresa NanoRacks instaló un bastidor para CubeSat en la Estación Espacial Internacional. Ahora lo alquila a

EL EQUIPO

El interior de un CubeSat

Los kits de montaje listos para usar —como el que ofrece la compañía Pumpkin por 7500 dólares— y otras piezas disponibles en el mercado brindan a los científicos la oportunidad de concentrarse en el utillaje que requieren sus experimentos, sin necesidad de diseñar la cápsula espacial entera. Debajo se ilustran componentes del kit que comercializa Pumpkin (ordenador de vuelo, paneles solares y chasis) y otras piezas adicionales (sistema de alimentación y baterías de la empresa Clyde Space y un transceptor de radio de Microhard Systems).



FOTOGRAFÍA DE SPENCER LOWELL

compañías farmacéuticas y a otras industrias interesadas en investigar en el espacio. También lo arrenda a organismos educativos; entre ellos, a un instituto.

Algunos CubeSat se dedican a la meteorología y al clima. El CloudSat, diseñado en la Universidad estatal de Colorado, estudiará la estructura y formación vertical de las nubes a lo largo de varios días, un objetivo que nunca se ha logrado desde aviones en vuelo. La Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense patrocina la misión Firefly, que desplegará un detector de rayos gamma y un fotómetro para medir los destellos de rayos gamma que se producen durante las tormentas.

CloudSat y Firefly observarán fenómenos que tienen lugar en la troposfera, la capa atmosférica de 16 kilómetros de espesor que se encuentra en contacto con la superficie terrestre. Otros CubeSat estudiarán la termosfera, la región que sufre el azote del viento solar y cuyo límite superior sube o baja según la actividad del Sol. Esos cambios afectan al rendimiento de los satélites en órbitas bajas: en 1979, la estación espacial estadounidense Skylab se estrelló después de que una ascensión imprevista de la termosfera aumentase la resistencia al avance de la estación y la hiciese caer a la Tierra. Dado que en la termosfera orbitan la Estación Espacial Internacional, los satélites GPS, los de radio y los de televisión, comprender los fenómenos que allí ocurren resulta tan crucial para las comunicaciones mundiales como lo es el conocimiento de los océanos para el comercio marítimo. Los satélites mayores, en órbitas más altas, no pueden observar de manera directa la termosfera. Los instrumentos equipados en cohetes sonda sí pueden tomar medidas directas, pero solo en su trayectoria de ascenso y durante pocos minutos.

El primer CubeSat explorador de la termosfera fue el SwissCube, lanzado por Suiza a finales de 2009. Este satélite mide y cartografía la luminiscencia nocturna (la débil luz emitida por las reacciones químicas y físicas en las capas altas de la atmósfera). Con ello busca comprender mejor sus causas, para filtrarla con mayor eficacia cuando se estudian otros fenómenos.

UNA NUEVA INDUSTRIA ESPACIAL

Quizá la innovación más llamativa aportada por los CubeSat haya sido la introducción de un nuevo modelo comercial en las actividades espaciales. Por regla general, los CubeSat de diferentes grupos se unen y se lanzan como cargas útiles secundarias. Aunque ello implique subordinar su lanzamiento a la conveniencia de los dueños de la carga principal, la comunidad ahorra dinero y distribuye los costes del lanzamiento entre los participantes.

Por otra parte, como apunta Kris W. Kimel, presidente y fundador de Kentucky Science and Technology Corporation, el bajo coste de los CubeSat admite errores y se presta a las innovaciones, cualidades esenciales para cualquier empresa en ciernes. Al resultar económicos, una explosión en la plataforma de lanzamiento o un despliegue fallido una vez en el espacio resultan mucho más tolerables. (Y no se trata de un caso hipotético: en 2006, catorce CubeSat se perdieron tras fallos en el lanzamiento y otros

Artesanía espacial

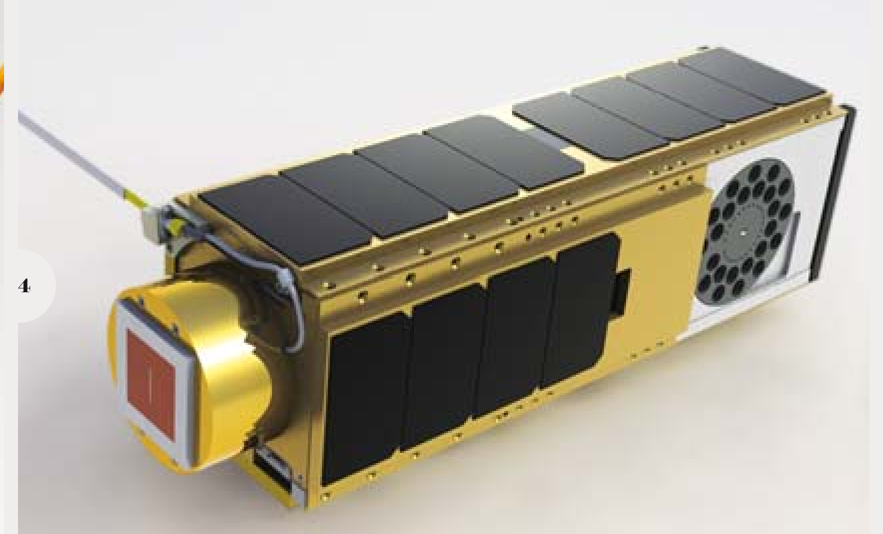
1. Orientación: Profesores y alumnos de la Universidad Politécnica de California prueban un sistema magnético para el ajuste de la orientación en vuelo de un CubeSat. La misión, CP6, fue lanzada con éxito en 2009.

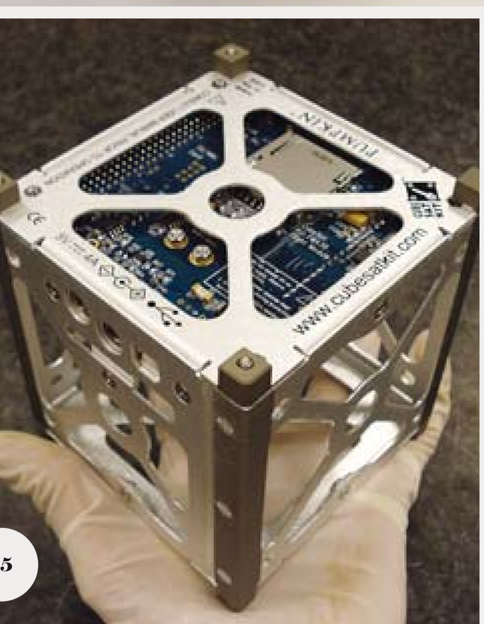
2. Más países: Suiza lanzó en 2009 su primer satélite, el SwissCube, en cuya construcción participaron unos 200 estudiantes. Este CubeSat estudió los efectos de los rayos cósmicos en las capas altas de la atmósfera.


1


2


3


4



5

3. Clima espacial: El Radio Aurora Explorer, lanzado el pasado noviembre, estudiará el efecto del viento solar sobre la ionosfera terrestre. Fue construido por la Universidad de Michigan y SRI International.

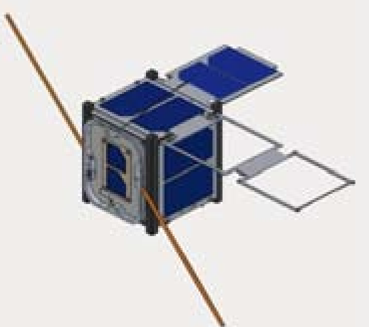
4. Vida en el espacio: La NASA lanzó el pasado noviembre un CubeSat para analizar organismos y sustancias orgánicas en órbita. Demostrará la capacidad para realizar experimentos biológicos espaciales a bajo coste.

5. Radioaficionados: Los alumnos de la Universidad de Lieja están construyendo un equipo orbital para la innovación en telecomunicaciones, destinado a las comunicaciones de radio digitales.

CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ESTADO DE CALIFORNIA (*1*); CORTESÍA DE EPFL (*2*); CORTESÍA DE SRI INTERNATIONAL (*3*); CORTESÍA DE NASA/AMES (*4*); CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LIEJA (*5*); UNIVERSIDAD DE VIGO (*XaTcobeo*)

6. En España: en nuestros centros de investigación se están llevando a cabo varios proyectos basados en CubeSat.

OPTOS (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) se propone demostrar la viabilidad de los CubeSat en misiones complementarias de los grandes y costosos proyectos espaciales. Ofrece altas prestaciones e incorpora diseños avanzados. Cuenta con cuatro experimentos, entre ellos una pequeña cámara para la observación de la Tierra. Se está integrando y ensayando el modelo de vuelo, cuyo lanzamiento está previsto para finales de 2011.



XaTcobeo (Universidad de Vigo en colaboración con el INTA, *izquierda*) se basa en el estándar CubeSat 1U. De alrededor de un kilogramo de peso, su objetivo es incorporar dos experimentos (una radio reconfigurable en vuelo y un medidor de radiación) y un mecanismo de validación de despliegue de paneles. Será lanzado durante el 2011, en el vuelo inaugural de VEGA, el nuevo lanzador de la Agencia Espacial Europea (ESA).

FemtoSat (Universidad de Vigo) corresponde a un prototipo de un satélite de menos de 300 gramos. Se propone demostrar que es posible dar una cobertura básica de comunicaciones mediante un dispositivo de bajo coste y corto tiempo de desarrollo. La clave reside en la miniaturización de los sistemas de control térmico y de estabilidad, y en la compatibilidad con el estándar CubeSat.

HumSAT (proyecto internacional) es la primera constelación de CubeSat que se utilizará para recoger datos de sensores distribuidos por todo el globo, sobre todo ambientales y de ayuda humanitaria. En este proyecto participa la Universidad de Vigo, que se ocupa de la definición y organización del sistema completo, la implementación de un satélite de cuatro kilogramos y la coordinación de todos los satélites. A través del programa GEOID de la ESA, al menos seis universidades europeas colaborarán y lanzarán ocho satélites compatibles con HUMSAT.

UPCSAT-1 (Centro de Investigación Aeronáutica y del Espacio de la Universidad Politécnica de Cataluña) servirá para ensayar el funcionamiento de nuevas células solares, así como nuevos sistemas termoeléctricos de generación de energía y de orientación. Incluirá también una cámara de fotos. El propósito es que en el futuro sirva de base para pequeños experimentos científicos y demostradores tecnológicos.

nueve establecieron un contacto escaso o nulo con las estaciones terrestres.) «No nos gusta perder uno —afirma Kimel—, pero no es lo mismo que perder 5 millones de dólares.» Como señala Andrew Kalman, presidente y jefe de arquitectura técnica de Pumpkin, los satélites estándar resultan demasiado grandes para permitirse un fallo.

Algunas misiones llevan esa postura al extremo: sitúan deliberadamente sus CubeSat en órbitas donde se autodestruyen con el fin de tomar datos interesantes. Según Puig: «Resulta factible diseñar un satélite desechable para emplazarlo en un lugar de riesgo. No solo podemos permitirnos fallos, sino que podemos diseñarlos a tal efecto y extraer provecho de ello».

Dos misiones en cuyo diseño ha participado uno de los autores (Twiggs) ejemplifican esa manera de proceder. En la primera colaboran grupos europeos, asiáticos y estadounidenses. El consorcio, denominado QB50, lanzará 50 CubeSat dobles hacia el límite superior de la termosfera. Durante varios meses, y a medida que la fricción atmosférica los frene y sus órbitas vayan descendiendo, tomarán datos relativos a la composición química, densidad y temperatura de la termosfera a diferentes altitudes, hasta que finalmente caigan a la Tierra.

La segunda misión, la Esfera de Calibración Atmosférica Pasiva en Orbita Polar, lanzará tres CubeSat 3U para medir el calentamiento de la atmósfera terrestre provocado por las fulguraciones solares. A medida que los satélites desciendan a través de la atmósfera polar, los expertos esperan obtener datos que les permitan comprender mejor los efectos de la actividad solar sobre la termosfera.

El reducido tamaño de una cápsula CubeSat individual y la escasa potencia de sus sistemas de comunicación limitan su capacidad para recoger datos. Por esta razón, la mayoría de las misiones emplean cubos dobles o triples. En estos momentos se experimenta con redes de CubeSat compuestas de varios satélites coordinados. Se investigan mejoras en la comunicación entre satélites, sistemas que permitan el vuelo en formación y hasta correas de varios kilómetros de longitud que los mantengan unidos.

La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa estadounidense patrocina un proyecto sobre redes de CubeSat, presupuestado en 75 millones de dólares. Su fin consiste en determinar las circunstancias bajo las que los CubeSat podrían reemplazar a los satélites tradicionales. Las constelaciones estables de CubeSat ofrecerían una alternativa a los instrumentos de gran tamaño. En la opinión de Gil Vernet, profesor emérito de la Universidad estatal de Utah, grandes redes de CubeSat distribuidos adecuadamente lograrían los mismos resultados que el Telescopio Espacial Hubble o el futuro James Webb. También se investigan otras mejoras. Paulo Lozano, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha desarrollado un minúsculo sistema de propulsión electrónica para el guiado de los microsatélites. Otros trabajan en la impresión de los componentes de CubeSat, con el objetivo de reducir costes.

En último término, afirma Kalman, los CubeSat podrían desempeñar una función análoga a la de los ordenadores personales: «una base sobre la que cada uno podrá desarrollar sus propias aplicaciones». El empleo de los CubeSat a modo de «PC espaciales» (económicos, flexibles, acondicionados y tipificados) sugiere una última finalidad, aún más revolucionaria: que los aficionados dispongan de acceso al espacio. Ello sucederá más bien pronto que tarde: una nueva compañía, Interorbital Systems, planea ofrecer kits de CubeSat con lanzamientos a órbitas bajas por menos de 10.000 dólares. Según Puig: «Los aficionados tendrán la oportunidad de participar. La gente comenzará a construir sus propios Hubble en miniatura».

PARA SABER MÁS

CubeSat design specification revision 12. Universidad Politécnica del Estado de California, 2009.
Página web oficial del Proyecto CubeSat: **www.cubesat.org**
La fabricación de un CubeSat puede verse en: **scientificamerican.com/feb2011/cubesats**

ECOLOGÍA

Amigo de las invasoras

Muchas especies invasoras no suponen una amenaza tan grande como algunos creen, según el ecólogo Mark Davis

Entrevista de Brendan Borrell

El ecólogo vegetal Mark A. Davis no participará en la «redada de espinos cervales» de este año en su barrio de St. Paul, Minnesota. No seguirá los pasos de los intrépidos cruzados dispuestos a erradicar el espino cerval común (*Rhamnus catharticus*) y el arraclán (*Frangula alnus*), dos arbustos ornamentales importados de Europa durante el siglo XIX. Estas plantas alóctonas (no nativas) han invadido algunos de los bosques, praderas y humedales del Medio Oeste americano. Ello empuja a voluntarios ecologistas a arrancar con ahínco las malas hierbas jóvenes, cortar los tallos gruesos y empapar de herbicidas los tocones que quedan. Su esperanza: que Minnesota recupere su estado primigenio.

En cierta época, Davis respaldaba también la erradicación de esas plantas «invasoras». Incluso propuso que se plantaran solo especies autóctonas (nativas) de Minnesota en el campus del Macalester College donde imparte clases. Su opinión cambió en 1994, cuando leyó un ensayo del periodista Michael Pollan en el *New York Times Magazine* que le sublevó. Montó en cólera cuando Pollan afirmaba que «retrasar el reloj ecológico hasta 1492 representa una empresa descabellada, fútil y, para colmo, sin sentido».

Una vez que Davis se hubo calmado, empezó a pensar detenidamente en el problema. De manera gradual, reconsideró sus premisas y desarrolló una posición más matizada sobre la amenaza de las especies no nativas. De acuerdo con esta nueva consideración, denominó a las alóctonas benignas HACE, de «Hemos de Aprender a Convivir con Ellas», lo que enfureció a algunos colegas. Tanto aquí como en su libro *Invasion biology* (Oxford University Press, 2009) argumenta que el tema necesita menos emoción y más ciencia.

EN SÍNTESIS

La migración de plantas, animales y otras especies fuera de su hábitat natural representa un riesgo al que algunos ecólogos han dado excesiva importancia, afirma un científico que antaño condenaba dichas amenazas.

Mark Davis, del Macalester College, opina que las especies invasoras solo deben despertar preocupación cuando generan una amenaza directa para la salud o el bienestar económico. Las extinciones provocadas por especies invasoras siguen siendo poco habituales. Las especies alóctonas no suelen terminar con las plantas y animales de la región que colonizan.

Los ambientes restringidos, como las islas, representan la única situación en que las especies alóctonas causan con frecuencia la desaparición de las poblaciones autóctonas.

Davis afirma que simplemente debemos aceptar la realidad de la movilidad de las especies.

AMY ECKERT



Usted ha intentado adoptar una postura escéptica en el debate sobre el impacto de las especies introducidas. Según su opinión, ¿qué hace que determinadas especies resulten problemáticas?

Davis: Una especie constituye un problema cuando los humanos la definimos como tal. Los organismos solo son organismos. No poseen ni moralidad ni ética; únicamente se limitan a vivir. La declaración de «bueno» o «malo» procede de los humanos. El dilema se presenta cuando las especies no suponen una amenaza para la salud, no causan ningún coste económico importante, pero se alega que ejercen un efecto ecológico indeseable. Y aquí considero muy importante poner en tela de juicio nuestras afirmaciones. Reflexionemos: ¿existe un daño, o simplemente un cambio, cuando determinadas especies nativas disminuyen su presencia? Considero socialmente irresponsable calificar de perjuicios esos cambios. Una vez declaramos la existencia de un daño o de una invasión, la sociedad se ve obligada a reducir o mitigar el mal, lo que requiere invertir recursos ya de por sí escasos. No veo justificable la utilización de recursos sociales para sostener proyectos que a menudo son poco más que afirmaciones de preferencia personal.

Algunos de los que critican su razonamiento dirían que la introducción de la serpiente arborícola parda (*Boiga irregularis*) en la isla de Guam, donde ha eliminado a diez especies de aves, representa algo más que un cambio. Se trata de un daño irreversible.

Estoy totalmente de acuerdo. El único ambiente en el que las especies introducidas pueden causar un gran número de extinciones, y ya lo han hecho, son los medios insulares, como las islas oceánicas o los lagos de agua dulce. Las especies responsables de las extinciones casi siempre corresponden a un depredador o a un patógeno, y en esos ambientes insulares y restringidos no existe ningún refugio para las presas o los huéspedes. De suerte que los depredadores introducidos pueden realmente eliminar a las presas. En ese tipo de hábitat, ciertamente, las especies introducidas constituyen una amenaza importante para la supervivencia de las especies autóctonas, y yo apoyo la inversión de recursos para evitar esa situación.

¿Acaso sugiere usted que el impacto de algunas especies alóctonas se ha exagerado?

Pocas especies alóctonas llegan a causar el daño de la serpiente arborícola parda. Hemos venido estudiando la hierba del ajo (*Alliaria petiolata*) en la estación experimental de Macalester, una planta que se ha extendido bastante en los robledales. El pasado verano realizamos un estudio en múltiples parcelas: registramos el número de especies en parcelas con aliaria y en parcelas sin ella. Existe la creencia generalizada de que la aliaria representa una planta «enemiga» que expulsa a las especies autóctonas. Pero en realidad, no hallamos ninguna relación entre la abundancia de hierba del ajo y el número de otras especies de plantas.

La ciencia no puede dejarse llevar por la ideología. Debe estar respaldada por datos sólidos. No me opongo en absoluto a las valoraciones, pero cuando los científicos las hacen, deben dejar claro que están expresando opiniones y no difundiendo conclusiones basadas en datos reales. Hemos visto lo sucedido con el cambio climático. En tanto que comunidad científica, lo peor que podemos hacer es proporcionar a los escépticos de la ciencia más argumentos para reforzar sus ideas sobre la escasa fiabilidad de los investigadores.

¿No actúan simplemente por prudencia los que intentan evitar la propagación de las especies alóctonas?

El principio de precaución se emplea continuamente. Básicamente significa: «Bien, debido a nuestro desconocimiento, a nuestra ignorancia como científicos, hemos de actuar en consecuencia». Lo cierto es que el mundo se está transformando de muchas maneras que no controlamos. Con el cambio climático, algunas especies se desplazarán a otras regiones, habrá nuevas combinaciones de especies en situaciones diferentes y regímenes meteorológicos distintos. Tampoco podemos predecir el comportamiento de esas especies. El futuro es imprevisible tanto para las especies autóctonas como para las alóctonas. Las especies nativas que en el pasado no han planteado problemas podrían muy bien hacerlo en el futuro. De modo que la preocupación por los daños venideros ha de aplicarse a todas las especies, no solo a las alóctonas.

¿Quiere usted decir que también las especies nativas pueden perjudicar el ambiente?

Sí, desde luego. El mejor ejemplo actual en Norteamérica lo ofrece el gorgojo descortezador del pino amarillo occidental (*Dendroctonus ponderosae*), un insecto nativo de los bosques de coníferas occidentales. El insecto, probablemente favorecido por el calentamiento del clima, ha experimentado en los últimos años una explosión demográfica y ha destruido la mitad de los árboles madereros en algunas zonas de la Columbia Británica. No cabe ninguna duda sobre el importante perjuicio económico que ha ocasionado.

Pero, sin enemigos naturales, una especie no nativa le lleva ventaja a las nativas. ¿Acaso no se han documentado las explosiones demográficas tras la introducción de una especie en un territorio nuevo?

Asa Gray, botánico estadounidense del siglo xix, afirmó que si se daban las condiciones adecuadas, cualquier especie podía convertirse en mala hierba. La proliferación de una especie en un lugar dependerá de la combinación de las características de la especie en cuestión y del ambiente donde se establezca.

Se han publicado docenas de artículos que intentan determinar si existen rasgos previsibles que permitan distinguir las especies invasoras de las que no lo son. En su mayor parte, los resultados no han podido aclarar esa cuestión.

Uno de los avances recientes más importantes ha consistido en descubrir que cuanto más tiempo lleva una planta invasora en una región, mayor es la retroalimentación negativa entre ella y el ambiente edáfico. En otras palabras, el número de patógenos del suelo que pueden infectarla aumenta y, como consecuencia, la planta invasora disminuye su presencia. Debe recordarse que el hecho de que una especie se introduzca y prolifere en un lugar no significa que se mantendrá siempre abundante. En realidad, si uno cree en la evolución, no cabría esperarlo así. Ahora bien, si una especie está causando un gran perjuicio económico o sanitario, no podemos aguardar a que la naturaleza se encargue de reducir el número de individuos. En ese caso, es necesario intervenir.

Los hábitats de pradera natural en los que usted trabaja representan también un territorio fundamental para la producción de biocombustibles. En la búsqueda de un cultivo óptimo para ese fin, ¿preferiría usted una planta nativa antes que una no nativa?

En algunos aspectos, no. No tengo una preferencia, ya que incluso algunas de las plantas autóctonas consideradas han des-





Ciertas especies no nativas, como la hierba del ajo, aliaria o ajera (*Alliaria petiolata, izquierda*) y el espino cerval (*Rhamnus catharticus, arriba*), se hallan distribuidas por todo el planeta. Según el ecólogo Mark Davis, las especies invasoras solo deben considerarse un problema cuando perjudican la salud o provocan pérdidas económicas.


AMY ECKERT

pertado preocupación, como el pasto varilla (*Panicum virgatum*). Para obtener la cantidad suficiente de biocombustible a partir de esa gramínea se necesitaría una enorme superficie de cultivo y tal vez haría falta plantarla fuera de su área de distribución actual. Por otra parte, si encontramos una especie nativa y hay lo bastante de ella, sin duda le daría prioridad. Lo que estoy intentando razonar es que deberíamos preocuparnos menos sobre la procedencia de una especie y centrarnos más en si realmente resulta perjudicial. Creo que, con el tiempo, los historiadores de la ciencia considerarán la inquietud por las especies alóctonas con respecto a las autóctonas como un fenómeno propio del siglo xx.

¿Dónde se originó el recelo hacia las especies no nativas? ¿Cuándo empezamos a darnos cuenta de nuestra influencia sobre la distribución de las especies?
No poseemos documentación acerca de ello, pero estoy seguro de que cuando los humanos colonizaron las islas del Pacífico Sur eran conscientes de que con ellos transportaban plantas y animales, algunos de los cuales se naturalizarían en su nuevo ambiente. En la época de la antigua Grecia, los botánicos sabían que a veces los viajeros traían plantas de otras regiones y las plantaban. En 1850, el explorador Alexander von Humboldt señalaba que la chumbera o nopal, *Opuntia*, de origen americano, se había extendido por Europa, Oriente Medio y África del Norte.

¿Cuándo se pasó de documentar los movimientos de esas especies a pensar en la necesidad de evitar su expansión e intentar erradicarlas?
En Estados Unidos, nuestra actitud hacia lo no nativo —no solo especies, sino otros aspectos— ha variado a lo largo de los últimos siglos. Cuando el país era joven, había interés en demostrar al mundo que no éramos una nación atrasada y aislada. También podíamos ser cosmopolitas, mundanos. De hecho, existía una afición por traer cosas de otras partes del mundo, ya se tratara de música, ópera o arte, como de plantas o animales. Algunas de las especies que llegaron así provocaron problemas, como los insectos causantes de plagas y las malas hierbas, que afectaron negativamente a la agricultura del país. Esa situación llevó a un cambio gradual de perspectiva a nivel nacional; se intentó controlar las especies que se importaban y las que ya se habían introducido. Tras la segunda guerra mundial, con la aparición de plaguicidas supuestamente milagrosos, como el DDT, los esfuerzos por gestionar las especies se transformaron en un empeño por erradicarlas con el nuevo producto. Ya sabemos qué ocurrió después.

¿Acaso el péndulo ha empezado a oscilar en la otra dirección?
Así lo creo. En la página web sobre especies invasoras del Departamento de Recursos Naturales de Minnesota hay una declaración que resalta que la mayoría de las especies alóctonas no ocasionan problemas. Tanto la perspectiva como el mensaje se están ahora matizando.

En la actualidad, más que nunca, necesitamos gastar los recursos fiscales de la sociedad de manera prudente y estratégica. El número de especies que se transportan alrededor del mundo está aumentando. Necesitamos concentrar nuestros recursos en aquellas especies que causan realmente perjuicios graves. Tendremos que aprender a convivir con las otras.

Brendan Borrell *es periodista. Escribe a menudo sobre ciencia y medioambiente para* Scientific American *y* Nature.

PARA SABER MÁS

Out of Eden: an odyssey of ecological invasion. Alan Burdick. Farrar, Straus & Giroux, 2005.
Invasion biology. Mark A. Davis. Oxford University Press, 2009.
Rambunctious garden: Saving nature in a post-wild world. Emma Marris. Bloomsbury (*en prensa*).



Martin Gorbahn pertenece al grupo de excelencia Universe y al Instituto para Estudios Avanzados de la Universidad Técnica de Múnich, donde investiga la física más allá del modelo estándar, el origen de la masa de las partículas y el problema de las jerarquías.

Georg Raffelt investiga en el Instituto Max Planck de Física y forma parte del grupo de excelencia Universe. Sus estudios se centran en astropartículas y cosmología; en particular, en la física de neutrinos y la búsqueda de los constituyentes de la materia oscura.

ALTAS ENERGÍAS

Viaje a la escala electrodébil

Por qué el Gran Colisionador de Hadrones del CERN deberá encontrar nueva física

Martin Gorbahn y Georg Raffelt

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, comenzó a acelerar protones a principios de 2010. La energía de sus experimentos supera a la alcanzada jamás en cualquier otro acelerador. Por primera vez, será posible estudiar las fuerzas de la naturaleza entre partículas elementales a distancias del orden de 10^{-19} metros: la diezmilésima parte del diámetro de un protón. Esta distancia, la escala electrodébil, desempeña un papel fundamental en la física de partículas: cuando dos partículas se acercan a distancias de ese orden, la fuerza electromagnética y la interacción débil comienzan a comportarse de manera similar.

Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, para estudiar las fuerzas que actúan entre partículas elementales se requiere una energía mayor cuanto menores sean las distancias a las que se investiga. La escala electrodébil se corresponde aproximadamente con una energía de un teraelectronvoltio (TeV, o 10^{12} electronvoltios), una energía unas mil veces mayor que la asociada a la masa de un protón. Unos 10^{-13} segundos después de la gran explosión, el universo se enfrió hasta alcanzar una temperatura equivalente a la energía de un TeV. De esta manera, gracias a los grandes aceleradores de partículas resulta posible investigar la evolución del universo «en dirección contraria»: a energías cada vez más altas y distancias cada vez más cortas. Cuestiones como la asimetría cósmica entre materia y antimateria o la existencia de materia oscura constituyen, con toda probabilidad, vestigios de esa prehistoria. A ambas les debe el universo su existencia y estructura actuales. Sin embargo, el modelo estándar no logra explicar ninguno de los dos fenómenos.

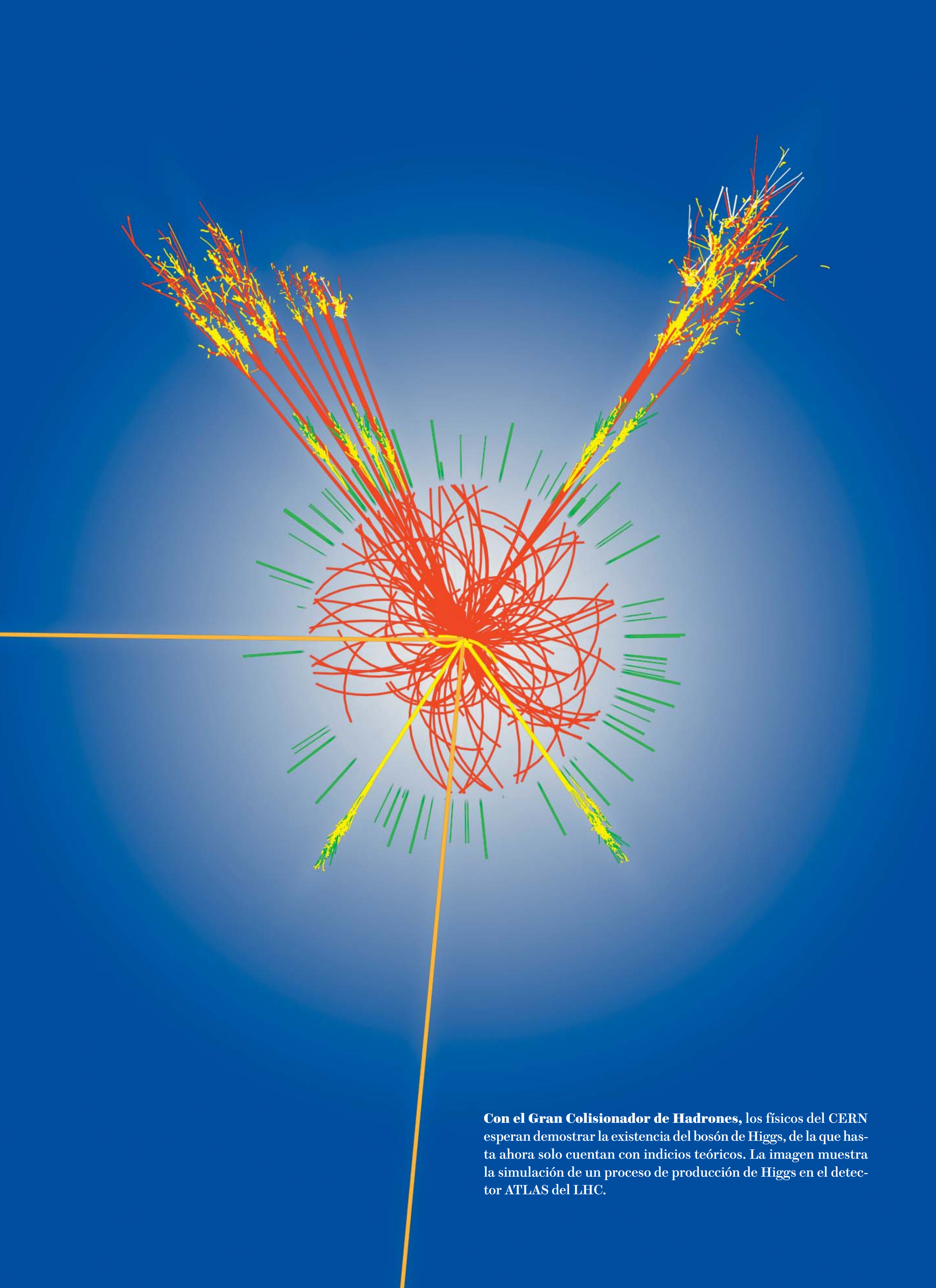
EN SÍNTESIS

El Gran Colisionador de Hadrones del CERN experimentará a energías equiparables a las que se alcanzaron unos 10^{-13} segundos después de la gran explosión. Ello permitirá estudiar la materia a distancias del orden de la diezmilésima parte del tamaño de un protón.

Se sabe que a tales energías habrán de observarse fenómenos nuevos, ya se trate de la partícula de Higgs o de interacciones hasta ahora desconocidas. En cualquier caso, el mecanismo responsable de la ruptura de simetría electrodébil debería manifestarse a esa escala.

No solo se espera completar el modelo estándar de la física de partículas. El LHC también podría hallar partículas supersimétricas o aquellas que componen la materia oscura. Varios indicios apuntan a la posibilidad de que ambas aparezcan a la escala del teraelectronvoltio.

ATLAS/CERN



Con el Gran Colisionador de Hadrones, los físicos del CERN esperan demostrar la existencia del bosón de Higgs, de la que hasta ahora solo cuentan con indicios teóricos. La imagen muestra la simulación de un proceso de producción de Higgs en el detector ATLAS del LHC.

El principio de incertidumbre, masa y energía

La física de partículas depende de manera crucial de las leyes de la mecánica cuántica. El principio de incertidumbre constituye una ley cuántica descubierta por Werner Heisenberg, cuya formulación podemos ver aquí de su puño y letra. En su forma más básica, dicho principio afirma que la posición q y el momento p de cualquier objeto no pueden determinarse a la vez con total precisión:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{1}{2}\hbar$$

Debido al ínfimo valor de la constante $\hbar$ (la constante de Planck h dividida por 2π), sus efectos solo son relevantes en el estudio de objetos microscópicos.

Estudiar las leyes físicas a distancias microscópicas requiere resolver la posición de las partículas con gran precisión, por lo que Δq ha de tomar un valor pequeño. Ello implica que la indeterminación en el momento y, con ella, el momento en sí, han de ser elevados. Algo parecido sucede en óptica, donde la resolución angular de un microscopio o un telescopio aumenta con la frecuencia de la luz. Se necesitan, por tanto, momentos elevados, es decir, altas energías para estudiar el microcosmos. Por ello, la física de partículas recibe tan a menudo el apelativo de física de altas energías: la distancia más corta a la que se puede resolver un fenómeno es proporcional a la mayor energía que logre alcanzar un acelerador.

El principio de incertidumbre implica que el alcance de una interacción es inversamente proporcional a la masa de la partícula que la transmite [*véase* «De una nota desafinada al principio de incertidumbre», por N. Treitz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2011]. La interacción electromagnética posee un alcance infinito, ya que el fotón carece de masa. La interacción débil, en cambio, es de corto alcance, puesto que la masa de los bosones Z y W asciende a unas cien veces la masa del protón.

Otra constante fundamental de la naturaleza es la velocidad de la luz en el vacío, c. Esta desempeña el papel de velocidad límite relativista: la mayor velocidad a la que pueden transmitirse energía o información. Según la ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

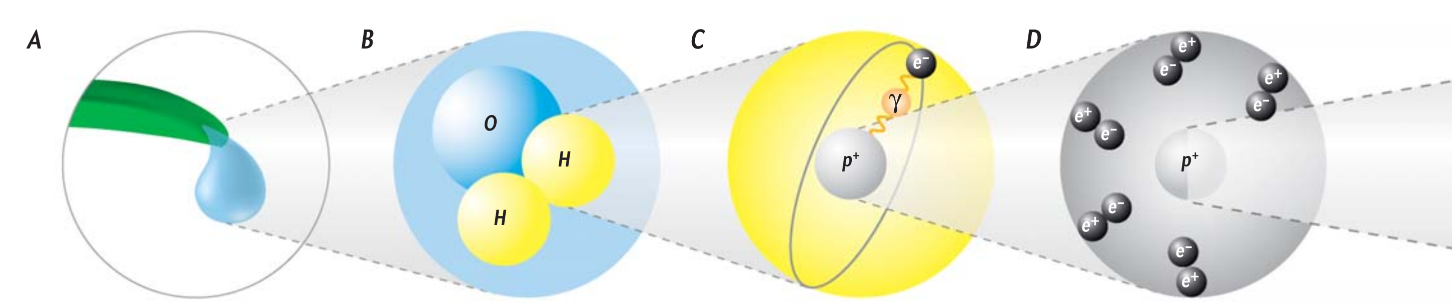
a cada energía le corresponde una masa equivalente, ya que masa y energía pueden transformarse una en otra. Por eso, los físicos de partículas no suelen distinguir entre ellas y miden ambas en las mismas unidades. En física de partículas se emplean los múltiplos del electronvoltio (eV), que equivale a la energía que gana un electrón cuando se acelera en una diferencia de potencial de un voltio. La masa del protón, por ejemplo, asciende a 0,935 GeV/c^2, lo que normalmente se expresa como 0,935 GeV (1 GeV = 10^9 eV). En estas unidades, la masa del electrón toma el valor de 0,511 MeV (1 MeV = 10^6 eV).

CUATRO INTERACCIONES FUNDAMENTALES

¿Qué entendemos por modelo estándar? ¿Dónde residen sus puntos fuertes y dónde sus límites? ¿Por qué las interacciones se comportan de una manera u otra según la distancia considerada? Para responder a tales cuestiones, hemos de atender primero a las propiedades cuánticas de las partículas elementales. El modelo estándar se asienta sobre la teoría cuántica de campos y las relaciones de simetría que dictan las interacciones entre partículas. Junto con la teoría de la relatividad, constituyen probablemente los edificios teóricos más abstractos y, al mismo tiempo, más exitosos que jamás se hayan construido.

Según la teoría cuántica de campos, todas las partículas elementales aparecen como excitaciones de campos cuánticos. Estos incluyen tanto las partículas de materia como las encargadas de transmitir las interacciones. El modelo estándar contempla tres interacciones fundamentales. La fuerza electromagnética es la relevante a distancias atómicas y la que, por ejemplo, mantiene unidos al electrón y al protón en un átomo de hidrógeno. Desde un punto de vista cuántico, esta interac-

Constitución de la materia



10^{-2} metros — Una gota de agua de 4 milímetros de diámetro se compone de 10^{11} moléculas.

10^{-9} metros — Una molécula de agua consta de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno.

10^{-10} metros — Un átomo de hidrógeno se encuentra formado por un electrón (e^-) y un protón (p^+). La interacción electromagnética entre ambos tiene lugar mediante el intercambio de un fotón (γ).

10^{-13} metros — De las fluctuaciones del vacío surgen electrones y positrones (e^+), los cuales apantallan la carga del protón.

ción se explica mediante el intercambio de fotones, las partículas que componen la luz. La interacción fuerte actúa a distancias nucleares. Es la responsable de unir a tres quarks para formar un protón o un neutrón; sus efectos se transmiten mediante el intercambio de partículas denominadas gluones. Por último, la interacción débil actúa a distancias inferiores a 10^{-18} metros y es la responsable de la desintegración beta de los núcleos radiactivos. Sus partículas mediadoras son los bosones W^+, W^- y Z^0.

Las partículas de intercambio se acoplan a las partículas de materia según la carga que estas posean, la cual puede ser de diferentes tipos: carga eléctrica, fuerte (también denominada «carga de color») o débil. Los electrones, por ejemplo, poseen solo carga eléctrica y débil. Los quarks son también portadores de carga fuerte. La intensidad con la que las partículas mediadoras se acoplan a la carga correspondiente viene determinada por la constante de acoplamiento. Existen tres constantes de acoplamiento, una por cada interacción fundamental. El valor de dichas constantes depende de la distancia (y, por tanto, de la energía) a la que tienen lugar las interacciones.

Queda aún una cuarta interacción fundamental de la naturaleza: la gravedad, la cual esconde más preguntas que respuestas. Esta fuerza no se deja enmarcar con facilidad en una teoría cuántica y no forma parte del modelo estándar. No actúa sobre carga alguna, sino sobre todo tipo de masa o energía. Además, es una interacción siempre atractiva. A pesar de su pequeña intensidad, es la fuerza que determina la evolución del universo a escalas cósmicas.

EL ROMPECABEZAS DE LA MASA

Cada una de las cuatro interacciones reviste una importancia relativa frente al resto según la escala de distancias que consideremos. A escalas macroscópicas, la fuerza electromagnética no suele jugar ningún papel relevante. Ello se debe a que la materia normal no porta carga eléctrica neta y los efectos de las cargas positivas y negativas se neutralizan. También ocurre así con la interacción fuerte y las cargas de color, a pesar de que los gluones, al igual que los fotones, carecen de masa. (El alcance de cualquier interacción mediada por una partícula sin masa es, en principio, infinito. Sin embargo, hace falta que las partículas mediadoras puedan «ver» cargas netas para poder actuar.) Por el contrario, la interacción débil presenta la particularidad de que sus partículas de intercambio, los bosones *W* y *Z*, poseen una gran masa. Ello limita de manera fundamental el alcance de la interacción.

La masa de los bosones débiles supone un rompecabezas teórico, ya que, en principio, todas las partículas mediadoras deberían carecer de masa. Para explicar el origen de la masa de los bosones *W* y *Z* se requiere introducir en el modelo estándar una partícula adicional: el bosón de Higgs. Hasta ahora, esta partícula no se ha encontrado. Como razón, se esgrime que los experimentos realizados hasta la fecha no han alcanzado la energía que se supone necesaria para producirla. Si bien la gran mayoría de los físicos de partículas cree que la energía a la que operará el LHC bastará para confirmar la existencia del bosón de Higgs, no es menos cierto que podrían existir otros mecanismos que solucionasen el problema de la masa de los bosones débiles. Algunos expertos conservan la esperanza de que el bosón de Higgs no aparezca y que, en su lugar, se produzcan descubrimientos inesperados más allá del modelo estándar.

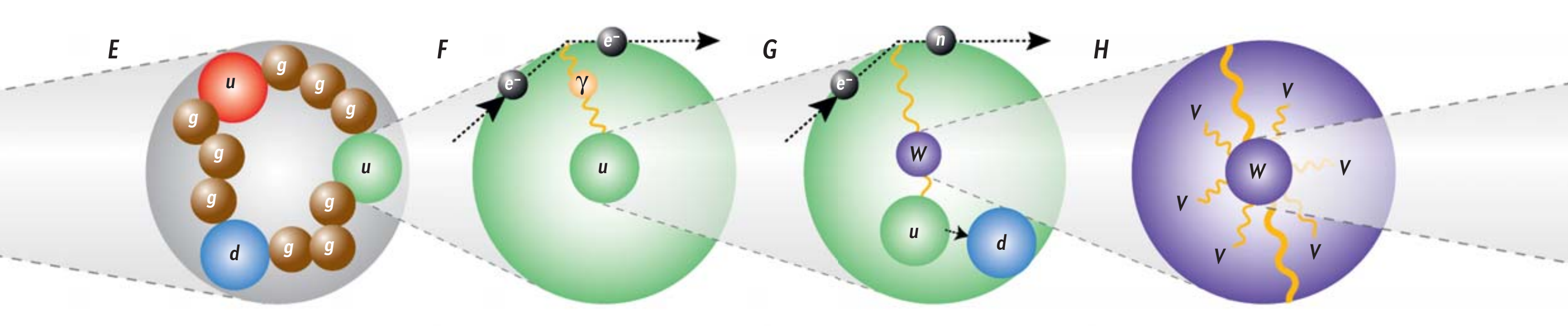
Para entender mejor cómo surge la masa de las partículas en una teoría cuántica de campos, por qué las fuerzas actúan de manera diferente según la distancia, o qué fenómenos nuevos pueden aparecer a la escala electrodébil (1 TeV, o distancias de de 10^{-19} metros) hemos de emprender un viaje al interior del mundo cuántico a distancias cada vez menores.

DEL ÁTOMO AL PROTÓN

Comencemos por las distancias atómicas, unos 10^{-10} metros, y consideremos el átomo de hidrógeno. Se trata del estado ligado entre un protón, con carga positiva, y un electrón, de carga negativa. La masa del átomo de hidrógeno se aproxima mucho a la suma de las masas del electrón y el protón; no obstante, a ello hay que restar la masa correspondiente a la energía de enlace (la atracción electromagnética que los mantiene unidos). Según la equivalencia entre masa y energía de Einstein ($E = mc^2$),

Esta serie de imágenes muestra la constitución de la materia en diez pasos a diferentes escalas: desde distancias macroscópicas hasta aquellas en las que se cree que se unifican todas las interacciones.

EXZELLENZCLUSTER UNIVERSE/ULRIKE OLLINGER

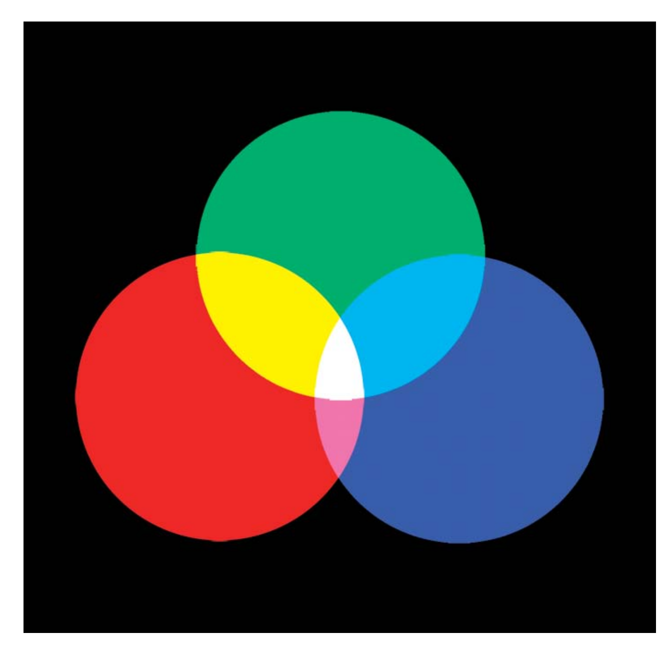


10^{-16} metros
Un protón se compone de dos quarks arriba (*u*) y un quark abajo (*d*). Estos permanecen unidos gracias al intercambio de gluones (*g*). La energía de enlace genera la mayor parte de la masa del protón.

10^{-17} metros
La interacción entre un quark arriba y un electrón se debe al intercambio de fotones.

10^{-18} metros
A estas distancias, la interacción mediada por un bosón *W* cobra cada vez mayor importancia, debido a que la distancia de 10^{-18} metros se corresponde aproximadamente con la masa del bosón *W*.

10^{-19} metros
La carga débil del bosón *W* se acopla al vacío (*V*). Ello explica el origen de su masa.



1+1+1 = 0: Un protón se compone de tres quarks, cada uno de ellos con una «carga de color» diferente. Sin embargo, la carga de QCD neta del protón es neutra. Esta imagen proporciona una analogía del fenómeno: al igual que la luz blanca aparece como la superposición de tres colores, la combinación de tres quarks en un protón da como resultado un estado sin carga de color.

dicha energía contribuye a la masa total del átomo de hidrógeno en unas 13 milmillonésimas partes.

Ampliemos ahora mil veces la potencia de nuestro microscopio y examinemos qué ocurre en las inmediaciones del protón, a una distancia de unos 10^{-13} metros. Debido a que esa escala se aproxima a la que se corresponde con la masa del electrón (unos 0,5 MeV), a tales distancias observaremos un nuevo efecto cuántico: la creación y aniquilación de pares de electrones y positrones (la antipartícula del electrón). Dichos pares surgen del vacío, por lo que al fenómeno se le denomina fluctuaciones cuánticas del vacío. Los pares que se materializan muy cerca del protón se orientan ligeramente con respecto a este: el protón atrae hacia sí los electrones y repele los positrones.

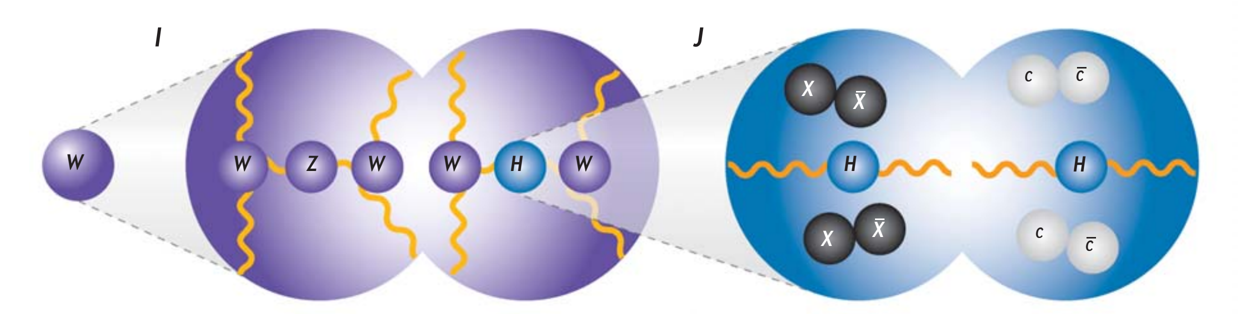
A través de esta «polarización del vacío», la carga original del protón se ve algo apantallada cuando se observa desde lejos. Pero, si penetramos en esa en nube de pares de partículas y antipartículas, comprobaremos que la intensidad de la interacción electromagnética aumentará cuanto más nos acerquemos al protón. Asimismo, a distancias aún menores, aparecen pares de quarks y antiquarks que contribuyen al apantallamiento de la carga eléctrica del protón y, con ello, a un incremento de la constante de acoplamiento electromagnética cuando nos acercamos aún más.

QUARKS Y GLUONES

Aumentemos mil veces más la imagen. Solo cuando alcanzamos los 10^{-16} metros resulta posible resolver la estructura del protón. Este se compone de dos quarks *arriba* y un quark *abajo*. Sin embargo, las masas de los quarks solo dan cuenta de una pequeña fracción de la masa del protón. Al contrario de lo que ocurría con el átomo de hidrógeno, ahora es la energía de enlace entre quarks la que contribuye a la mayor parte de la masa total.

Para explicar el origen de esa energía de enlace y la manera en que los quarks se unen en un protón necesitamos una fuerza más: la interacción fuerte. La teoría cuántica de campos que la describe, desarrollada durante la década de los sesenta del siglo xx, se denomina cromodinámica cuántica (QCD, por sus siglas en inglés). Al igual que la carga eléctrica puede ser de dos tipos (positiva o negativa), los quarks pueden poseer una de tres cargas de color posibles. La suma de las tres cargas de color distintas da cero como resultado, de ahí la metáfora cromática: la unión de los tres colores primarios de la luz (rojo, verde y azul) produce luz blanca.

A bajas energías, los quarks solo aparecen en estados confinados cuya carga neta de color es neutra, como el protón. En consecuencia, a distancias mayores que el radio del protón, la interacción fuerte queda apantallada. Los quarks no pueden existir de forma aislada, lo que hizo que en un principio se discutiera su interpretación como partículas auténticas. Si miramos el protón a distancias menores e investigamos la dinámica de los quarks a energías más altas, veremos que estos se comportan de manera similar a partículas libres, un fenómeno denominado «libertad asintótica». Por este descubrimiento trascendental, David Gross, Hugh David Politzer



10^{-19} metros

Los bosones *W* interactúan mediante el intercambio de un fotón, un bosón *Z* o una partícula de Higgs (*H*). Si la masa del Higgs excediese el TeV, la interacción entre bosones *W* dejaría de ser débil.

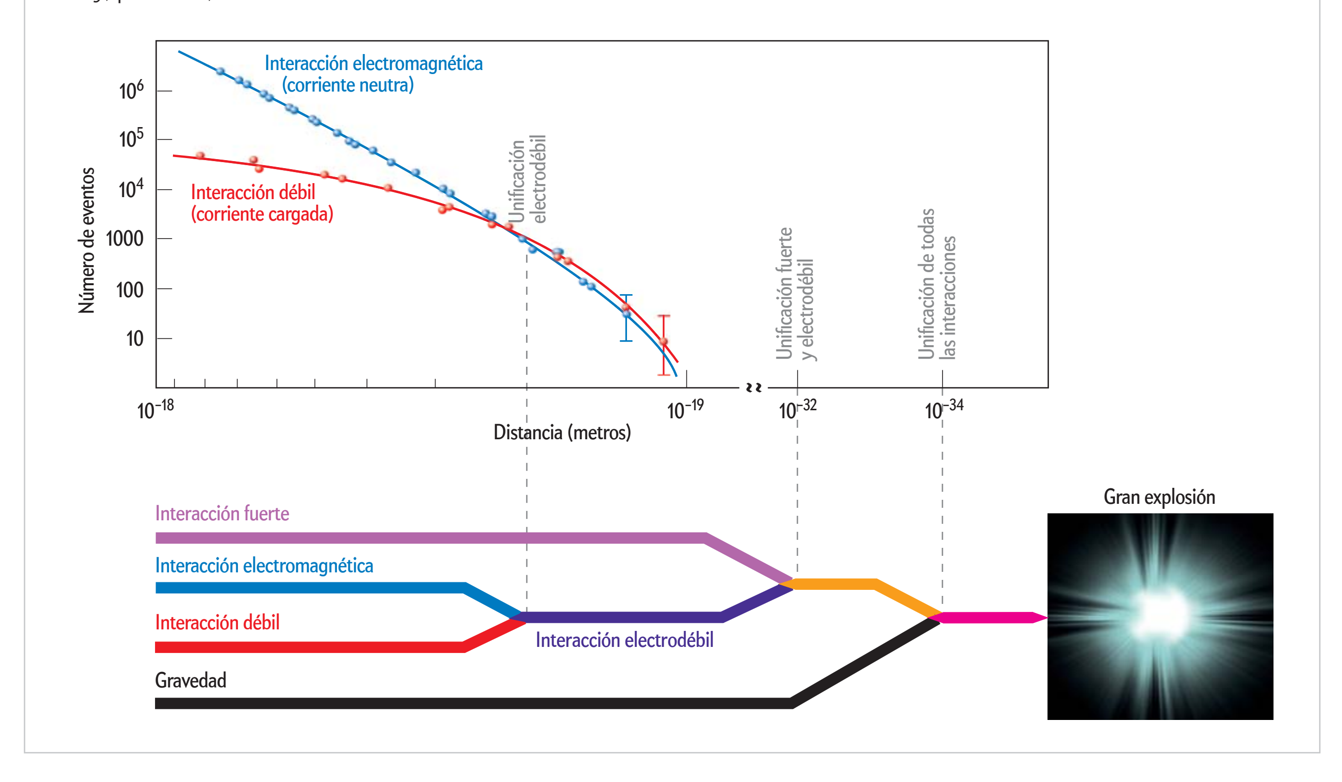
10^{-32} metros

Las fluctuaciones del vacío de las partículas (*X*) que deberían aparecer a estas escalas modifican la masa del bosón de Higgs en diez órdenes de magnitud. En caso de existir, las partículas supersimétricas suprimirían ese aumento de masa.

STERNE UND WELTRAUM (*carga de color*)

La unificación electrodébil

Esta tabla muestra la unificación de las interacciones electromagnética y débil en una escala que va de los 10^{-18} a los 10^{-19} metros, tal y como fue medida en el experimento HERA de DESY, en Hamburgo. Allí se estudia con qué frecuencia y de qué manera un electrón y un protón interactúan en función de la distancia que los separa. Solo la interacción débil puede transferir carga eléctrica y, por tanto, convertir el electrón en un neutrino. En estos casos se habla de «corrientes cargadas» (*rojo*). La interacción electromagnética contribuye únicamente a las «corrientes neutras» (*azul*). A distancias inferiores a los $2 \cdot 10^{-18}$ metros, las corrientes cargadas y neutras se comportan de manera similar, por lo que se habla de unificación electrodébil. Se supone que a escalas aún menores (de 10^{-32} a 10^{-34} metros) tiene lugar la unificación de todas las interacciones.



y Frank Wilczek fueron galardonados con el premio Nobel de física en 2004.

La libertad asintótica aparece como consecuencia de la dependencia con la distancia de las interacciones fuertes. Si bien aquí los pares quark-antiquark que surgen del vacío también apantallan la interacción fuerte, en este caso aparecen las fluctuaciones del vacío debidas a los gluones. Estas provocan un efecto opuesto y más potente. (Al contrario que los fotones, que no poseen carga eléctrica, los gluones sí poseen carga de color.) Como resultado, la intensidad del acoplamiento de la interacción fuerte es débil a cortas distancias y aumenta a distancias mayores, o menores energías. Dichas energías son mayores que las masas de los quarks *arriba* y *abajo*, lo que provoca que estos queden confinados en el protón, de color neutro.

El fuerte aumento de la constante de acoplamiento de QCD a grandes distancias explica también por qué la energía de enlace del protón es mucho mayor que la suma de las masas de sus quarks. De esta manera, la cromodinámica cuántica proporciona un mecanismo dinámico para generar la masa de las partículas. La gran parte de la masa de la materia presente en el universo procede de la energía de enlace de los protones y neutrones; es decir, proviene de la interacción fuerte. Como veremos después, este mecanismo de producción dinámica de masa convierte a la QCD en un prototipo atractivo a la hora de explicar el origen de la masa a partir de interacciones más allá del modelo estándar.

UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL

Consideremos ahora el interior del protón con mayor resolución e imaginemos la colisión de un electrón contra uno de sus quarks *arriba*. Puesto que el electrón no posee carga de color, solo puede interactuar con el quark mediante el intercambio de un bosón W, un bosón Z o un fotón. La transformación de un protón en un neutrón se debe a la conversión de un quark *arriba* en un quark *abajo*. Debido a que, durante el proceso, la carga eléctrica del quark cambia, debe participar en él un bosón W^-, con carga negativa. Este bosón transforma el electrón en un neutrino. Los intercambios de una partícula mediadora dotada de carga eléctrica se denominan corrientes cargadas. Por otro lado, las corrientes neutras son aquellas en las que media una partícula neutra, como el bosón Z o el fotón. Tras un proceso de corrientes neutras, un electrón continúa siendo un electrón.

A distancias mayores de 10^{-18} metros dominan la corrientes neutras, ya que, como mencionamos más arriba, el intercambio de fotones es de largo alcance, mientras que el de los boso-

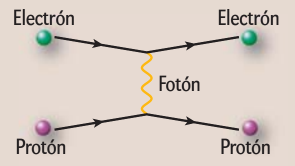
DESY/STERNE UND WELTRAUM

Partículas, fuerzas y campos cuánticos

Las propiedades de las partículas de materia y las de aquellas que transmiten las interacciones se encuentran íntimamente relacionadas. Cada una de las interacciones fundamentales se muestra relevante a cierta escala de distancias. Sin embargo, todas ellas se rigen por principios similares: las partículas de materia se atraen o se repelen en función de su carga eléctrica, débil o fuerte, y dicha atracción o repulsión se explica mediante el intercambio de una partícula intermediaria, la asociada a la interacción pertinente.

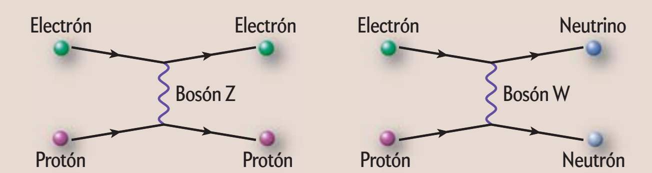
En los albores del siglo XX, Max Planck descubrió que, para aplicar las leyes de la termodinámica a las ondas electromagnéticas, debía imponer que estas interaccionasen con la materia en paquetes discretos de energía, a los que denominó «cuantos». En 1905, Einstein mostró que, en el efecto fotoeléctrico, los átomos absorbían y emitían luz en forma de cuantos de luz, o fotones. A una onda electromagnética de frecuencia ν le corresponden cuantos con energía dada por $E = h\nu$, donde h simboliza la constante de Planck.

Así pues, los campos que median las interacciones, como el campo electromagnético, también quedan descritos por partículas. La interacción entre dos partículas dotadas de carga eléctrica se interpreta como el intercambio entre ambas de un fotón. La intensidad de dicho intercambio queda determinada por la constante de acoplamiento. Aquí reproducimos el diagrama de Feynman que representa la dispersión entre un electrón y un protón como consecuencia del intercambio de un fotón:

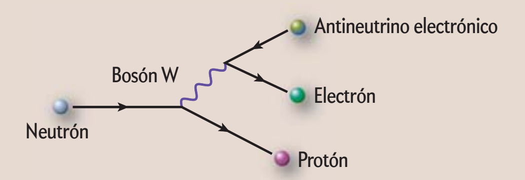


La interacción débil se transmite a través del intercambio de los bosones Z^0 (neutros) y los bosones cargados eléctricamente W^+ y W^-. Estos poseen masas cercanas a los 100 GeV, lo que limita el alcance de la interacción. Cuando consideramos procesos a energías cercanas a la masa de los bosones Z y W, la interacción electromagnética y la débil se comportan de manera similar. Sin embargo, la interacción débil no actúa solo sobre partículas dotadas de carga eléctrica, sino que afecta también a los neutrinos.

Los bosones W^+ y W^- son portadores de carga eléctrica. Por ello, bajo su intercambio las partículas afectadas cambian el valor de su carga: un protón puede transformarse en un neutrón, o un electrón puede convertirse en un neutrino. Es decir, no solo transmite una fuerza, sino que se transforma la identidad de las partículas. Los ejemplos siguientes muestran la dispersión de partículas por medio de la interacción débil con y sin modificación de la carga eléctrica:



Aún más interesante es la función que desempeña la interacción débil en la desintegración de un neutrón libre, partícula cuya vida media asciende a unos 15 minutos. Siempre que lo permitan las leyes de conservación de la energía, del momento angular, de la carga eléctrica y de otros números cuánticos, toda partícula se desintegrará en otras más ligeras. Mediante la emisión de un bosón W^-, el neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico.



La elevada masa del bosón W (unas 100 veces mayor que la masa del neutrón) «alarga» la vida del neutrón. Dispersión y desintegración por medio de bosones intermediarios constituyen fenómenos

nes W y Z solo puede darse a distancias cortas. Pero si nos acercamos al quark *arriba* a una distancia de 10^{-18} metros, lo que equivale a una energía de unos 80 GeV, veremos que la corriente cargada y la neutra se comportan de manera similar. Ese parecido se debe a la existencia de una simetría entre el acoplamiento de los fotones, los bosones Z y los bosones W: la simetría electrodébil del modelo estándar. En lo que se refiere a la interacción electrodébil, los fotones no poseen carga de ningún tipo (ni eléctrica ni débil), los bosones Z solo poseen carga débil y los bosones W presentan ambos tipos de carga.

La ruptura de la simetría electrodébil a distancias mayores de 10^{-18} metros se produce por medio del mecanismo de Higgs. Se trata de un proceso esencial en el modelo estándar, conocido en la jerga técnica como ruptura espontánea de simetría. En ella juega un papel fundamental la estructura del vacío. A pesar de su nombre, en la teoría cuántica de campos el «vacío» no equivale a la desaparición de todos los campos. Antes bien, describe la situación en la que todos los campos cuánticos se encuentran en el estado de menor energía posible, que en la teoría cuántica nunca es cero. El vacío del modelo estándar queda descrito por la presencia de un campo que posee carga débil. Dado que los bosones W y Z interaccionan débilmente, se acoplan al vacío. Cuando se propagan, ese acoplamiento con el vacío les dota de una cierta «inercia» y, de esa forma, adquieren masa.

Las masas de los bosones W y Z se han medido con exactitud y sus valores se hallan en gran acuerdo con las predicciones del mecanismo de Higgs. No obstante, la partícula correspondiente a las excitaciones cuánticas del campo de Higgs aún no ha sido encontrada. La cuestión principal, y que solo puede resolverse mediante experimentos que impliquen distancias de 10^{-19} metros, reside en si la ruptura de la simetría electrodébil se produce como consecuencia del campo de Higgs o gracias a otro mecanismo. Ello constituye el objetivo primordial que persigue el LHC.

PROBLEMAS CON EL HIGGS

Para explicar la ruptura de simetría electrodébil, el mecanismo de Higgs supone una ampliación mínima del modelo, en el sentido de que solo requiere un campo cuántico más. Las caracte-

muy parejos, si bien la desintegración carece de análogo en un contexto ajeno a la mecánica cuántica.

Lo anterior nos lleva a la conclusión de que los campos cuánticos desempeñan un papel mucho más general que las fuerzas clásicas. Las partículas mediadoras aparecen como las excitaciones de los campos cuánticos y, de igual manera, los electrones también surgen como las excitaciones del campo correspondiente. La diferencia principal entre ambas partículas reside en su espín (su momento angular intrínseco). Todos los bosones de intercambio poseen espín 1; por su parte, todas las partículas de materia presentan espín 1/2. Estas últimas se denominan fermiones, los cuales exhiben un comportamiento diferente al de los bosones. Sin embargo, toda partícula aparece como la excitación del campo cuántico que le es propio. Por su parte, la teoría cuántica constituye una consecuencia inevitable de la unión entre la teoría de la relatividad especial y la mecánica cuántica.

Según la clase de interacciones a las que se someten, las partículas de materia se clasifican en tres tipos. Los leptones carentes de carga eléctrica (los neutrinos) solo experimentan los efectos de la interacción débil. Los leptones cargados (el electrón, el muon y la partícula tau) poseen carga eléctrica negativa y experimentan la interacción débil y la electromagnética. Por último, los quarks también llevan carga eléctrica. En unidades de la carga del protón, esta asciende a +2/3 o –1/3, según el tipo de quark. Además, estas partículas poseen también «carga de color», lo que las hace sensibles a la interacción fuerte. Esta última se transmite mediante el intercambio de gluones, partículas sin masa.

Los fermiones se ordenan en una especie de tabla periódica de tres familias de masa creciente. La primera familia contiene un quark *arriba* y un quark *abajo*, un electrón y un neutrino. Los fermiones pertenecientes a las otras dos familias se muestran análogos a los de la primera, solo que poseen masas mayores. Las tres variantes de cada fermión se denominan «sabores». Se desconoce la razón de la existencia de varias familias de leptones y quarks. Tampoco se sabe por qué su número asciende a tres.

Mientras que los quarks experimentan todas las interacciones, los leptones cargados solo se someten a la interacción débil y a la electromagnética, y los neutrinos, únicamente a la interacción débil. Los efectos de la gravedad son universales.

	Fermiones (espín 1/2)			
	Quarks		Leptones	
	Carga eléctrica +2/3	Carga eléctrica -1/3	Carga eléctrica -1	Carga eléctrica 0
1.ª Familia	*u* Arriba	*d* Abajo	e^- Electrón	ν_e Neutrino electrónico
2.ª Familia	*c* Encanto	*s* Extraño	μ Muon	ν_μ Neutrino muónico
3.ª Familia	*t* Cima	*b* Fondo	τ Tau	ν_τ Neutrino tauónico

Interacciones fundamentales	
	Gravitación
W^+ W^- Z^0 Bosones *W* y *Z*	Interacción débil
Fotón	Interacción electromagnética
Gluones	Interacción fuerte

rísticas del campo de Higgs se eligen de tal manera que su estado fundamental reproduzca la estructura del vacío necesaria para la ruptura de simetría. Sin embargo, la teoría no predice la masa de la partícula de Higgs. Esta permanece como un parámetro indeterminado del modelo.

Un problema radica en que la introducción del campo de Higgs equivale más a una descripción de la ruptura de simetría electrodébil que a una explicación del fenómeno. En cierto sentido, la propuesta se asemeja al postulado del éter en el siglo XIX: un campo que todo lo permea, introducido por exigencias teóricas. Si bien el modelo de Higgs concuerda con todos los hallazgos experimentales, aún falta por detectar la partícula asociada y determinar su masa. Los indicios experimentales tan solo apuntan a que su valor debería rondar los 115 GeV (la masa de unos 115 protones).

Pero ¿existe un límite superior para la masa del Higgs? Para averiguarlo, imaginemos un experimento en el que se hacen colisionar dos bosones *W*. Según la teoría, los bosones *W* pueden interactuar intercambiando un fotón, un bosón *Z* o una partícula de Higgs. La contribución del bosón de Higgs a la interacción aumenta con su masa: para una masa del Higgs en torno a 115 GeV, dicha contribución resulta del mismo orden que las que aporta el intercambio de un fotón y un bosón *Z*. Pero si la masa del Higgs superase el TeV, su contribución sería tan grande que la interacción entre los bosones *W* ya no sería débil. Así pues, o bien la masa de la partícula de Higgs no supera el TeV, o bien a dicha escala de energías debe aparecer alguna interacción nueva para explicar el fenómeno. Es por ello que los físicos dan casi por seguro que el LHC habrá de descubrir algo: o bien la partícula de Higgs, o bien una nueva fuerza a la escala del TeV.

Consideremos ahora un aumento hasta distancias del orden de 10^{-32} metros, la denominada «escala de gran unificación». A estas energías, las excitaciones cuánticas se corresponden con partículas muy pesadas, con masas del orden de 10^{15} GeV. Según el modelo estándar, dichas partículas se acoplan al bosón de Higgs y modifican su masa mediante un mecanismo similar a la dependencia de las constantes de acoplamiento con la distancia. Pero, en este caso, la masa del bosón de Higgs no aumenta en un orden de magnitud, sino en diez.

EXZELLENZCLUSTER UNIVERSE/ULRIKE OLLINGER/*STERNE UND WELTRAUM*

NUEVA FÍSICA

Más allá del modelo estándar

Se han ideado numerosas ampliaciones del modelo estándar. Muchas de ellas pueden clasificarse en alguna de las siguientes categorías:

Teorías de gran unificación: A distancias de 10^{-32} metros, la interacción débil, la fuerte y la electromagnética se comportarían de forma similar. Estas teorías requieren la existencia de partículas con masas del orden de 10^{15} veces la masa del protón.

Extensiones del mecanismo de Higgs: La ruptura de la simetría electrodébil (y también la de las teorías de gran unificación) puede generarse por medio de diferentes modificaciones del mecanismo de Higgs, que incluirían varias partículas. El modelo estándar solo contempla una partícula de Higgs.

Supersimetría: La supersimetría adjudica a cada partícula conocida una compañera supersimétrica. Soluciona de manera natural el problema de las jerarquías, el cual aparece en el modelo estándar con bosón de Higgs. Por esta razón, numerosos expertos consideran que el modelo de Higgs debería ir acompañado de esta simetría extra de la naturaleza.

Tecnicolor: En estas teorías, la ruptura de simetría electrodébil se debe a la existencia de nuevas interacciones similares a las que describe QCD. No se requiere ninguna partícula de Higgs, por lo que el problema de las jerarquías no aparece.

Dimensiones extra: Si existiesen más de tres dimensiones espaciales, se modificarían las propiedades de las partículas. En estas teorías, la simetría electrodébil también puede romperse sin necesidad de introducir el bosón de Higgs.

Al considerar los procesos cuánticos que habrían de ocurrir a distancias de 10^{-32} metros, se obtiene que las masas de los bosones *W* y *Z* deberían ser mayores que las medidas experimentalmente. Parece, de hecho, que el propio mecanismo de ruptura de simetría electrodébil debería tener lugar a la escala de gran unificación, no a la escala del TeV. Sin embargo, a pesar de las fluctuaciones del vacío a altas energías, la masa de los bosones *W* y *Z* permanece en torno a los 100 GeV en lugar de trasladarse a la escala de la gran unificación. No existe en el modelo estándar ningún mecanismo natural que explique por qué se conserva esta jerarquía en las masas de las partículas, dificultad que ha dado en llamarse «problema de las jerarquías».

MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

Se han concebido diversas extensiones del modelo estándar con el objetivo de resolver el problema de las jerarquías. Existen dos soluciones posibles: o se amplía el modelo de Higgs mediante la introducción de una simetría adicional, denominada supersimetría, o se genera la ruptura de simetría electrodébil por medio de un mecanismo alternativo al modelo de Higgs.

La supersimetría constituye la única posibilidad conocida para resolver de manera natural el problema de las jerarquías dentro del modelo estándar con bosón de Higgs. Las partículas elementales se clasifican en fermiones (partículas con espín semientero, a las que pertenecen las partículas de materia, como electrones o quarks) o bosones (partículas con espín entero, a las que pertenecen las partículas mediadoras de las interacciones). Cuando se calculan las correcciones cuánticas a la masa del Higgs, fermiones y bosones contribuyen con signos opuestos. La supersimetría implica que, por cada partícula conocida, ha de existir una «compañera supersimétrica»: por cada fermión debería haber un compañero supersimétrico bosónico, y viceversa. Así, sus contribuciones mutuas a las fluctuaciones del vacío se cancelarían y la masa del Higgs permanecería de manera natural en la escala electrodébil.

Si la supersimetría fuese una simetría exacta de la naturaleza, las masas y constantes de acoplamiento de las partículas supersimétricas habrían de coincidir con las de las partículas del modelo estándar. Al electrón, por ejemplo, habría de corresponderle un supercompañero bosónico con su misma masa. Sin embargo, hasta la fecha no se ha encontrado la compañera supersimétrica de ninguna partícula conocida. Ello implica que, en caso de existir, también la supersimetría debe ser una simetría rota. Pero, para que una supersimetría rota continúe resolviendo el problema de las jerarquías, dicha ruptura no puede suceder a escalas de energía muy elevadas. Las compañeras supersimétricas del modelo estándar no podrían, por tanto, poseer una masa mucho mayor que 1 TeV.

La existencia de partículas supersimétricas modifica las interacciones del modelo estándar. En particular, cambiaría la dependencia con la distancia de las constantes de acoplamiento y, a distancias de 10^{-32} metros, las tres interacciones exhibirían la misma intensidad. Dicha convergencia en la intensidad de las interacciones representa un gran atractivo adicional en favor de la supersimetría.

Otra posibilidad para solucionar el problema de las jerarquías pasa por introducir un mecanismo de ruptura dinámica de la simetría electrodébil: explicar el origen de la masa de los bosones *W* y *Z* mediante una nueva interacción, lo cual haría innecesario el bosón de Higgs. Entre los modelos que intentan implementar este mecanismo se cuentan las llamadas teorías de «tecnicolor», inspiradas en la cromodinámica cuántica. Como vimos más arriba, la masa de partículas como el protón se debe, sobre todo, a los efectos de la interacción fuerte. En las teorías de tecnicolor, se introduce una nueva fuerza que genera, de manera dinámica (debida a la interacción), las masas de los bosones *W* y *Z*. Por desgracia, el mismo mecanismo no produce masas para los fermiones —algo que el modelo de Higgs sí consigue—, razón por la que las teorías de tecnicolor requieren extensiones intrincadas.

EXPERIMENTOS DE PRECISIÓN

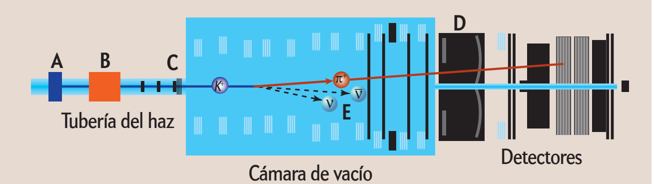
Otra posibilidad para examinar la física a la escala electrodébil consiste en examinar las predicciones del modelo estándar con suma precisión. Por ejemplo, al examinar los procesos o «canales» de desintegración exóticos de algunas partículas.

El experimento NA62, previsto en el CERN, pretende efectuar medidas de este estilo. Con él se estudiará la desintegración de un quark *extraño* en un quark *abajo,* un neutrino y un antineutrino. Dicho proceso sucede cuando se alcanzan energías del orden del TeV: una fluctuación del vacío en la que se produce un quark *cima,* la partícula más pesada conocida, es la responsable de la desintegración. En el modelo estándar, el acoplamiento del quark *cima* a los quarks *abajo* y *extraño* resulta extremadamente pequeño, por lo que la probabilidad de semejante desintegración es ínfima, del orden de 10^{-10}. Si las medidas de precisión detectasen una desviación de este valor, ello solo podría apuntar a la existencia de física más allá del modelo estándar.

El experimento NA62 del CERN

En el experimento NA62 del CERN se pretende medir la desintegración, muy poco frecuente, de un kaón con carga eléctrica en un pion cargado, un neutrino y un antineutrino. El estudio del proceso busca obtener pistas sobre la física más allá del modelo estándar. El kaón contiene un quark *extraño*, el cual se desintegra en dos neutrinos y en un quark *abajo*. Este último pasa a formar parte de un pion. El quark *extraño* es similar al quark *abajo*, pero más pesado. Sus singulares propiedades de desintegración le granjearon su nombre. Según el modelo estándar, tan solo una de cada 10^{10} desintegraciones del kaón produce un pion y un par de neutrinos. Si se observase una desviación de ese valor, ello solo podría deberse a física ajena al modelo estándar.

Para detectar una desintegración tan poco probable, en el experimento NA62 se generarán grandes cantidades de kaones (*A*). Otras partículas producidas se filtrarán en la tubería del haz (*B*). El momento del kaón cargado se mide antes de que entre



en la cámara de vacío (*C*); el momento del pion, en los detectores de partículas situados al final de dicha cámara (*D*). Después ha de procederse con sumo cuidado: el kaón se desintegra 10^9 veces más a menudo en un segundo pion neutro que en un par de neutrinos (*E*). Para diferenciar entre ambos eventos, se reconstruye la masa del par de neutrinos a partir de los momentos del kaón cargado y del pion. Los físicos experimentales denominan al proceso «supresión del ruido» de piones.

En EE.UU., Japón y Suiza se están realizando experimentos para investigar esta y otras desintegraciones exóticas similares, los cuales quizás arrojen luz desde una perspectiva nueva sobre la física a la escala TeV. En combinación con la búsqueda directa de nuevas partículas pesadas, tales experimentos permitirán discriminar mejor entre las distintas ampliaciones del modelo estándar.

MATERIA OSCURA

El estudio de la física a la escala electrodébil no solo nos ayudaría a mejorar nuestra comprensión del modelo estándar, sino que quizá resuelva el enigma de la materia oscura: cierto tipo de materia invisible (ya que no emite ni absorbe radiación electromagnética) pero de cuya existencia astrofísicos y cosmólogos saben desde hace tiempo, pues proporciona la masa necesaria para explicar los procesos gravitatorios que rigen la dinámica de las galaxias y la evolución del cosmos a gran escala.

Hasta ahora, no conocemos ninguna partícula que pueda componer este tipo de materia. Los neutrinos no interactúan con los fotones, por lo que son «oscuros», pero su ínfima masa no logra dar cuenta de los efectos gravitatorios observados. En general, las partículas dotadas de muy poca masa no pueden ser las responsables de la materia oscura, ya que su elevada velocidad de propagación impediría que se formasen las grandes estructuras cósmicas observadas. Ello solo se consigue con materia oscura «fría», la constituida por partículas que, en los albores del universo, se movían con la lentitud suficiente como para que la materia se aglutinase y formase las galaxias.

Desde hace tiempo se especula con la posibilidad de que la materia oscura se componga de WIMP (del inglés *weakly interacting massive particles*), partículas masivas que interactúan débilmente. Estas se asemejarían a los neutrinos, pero con una masa muy superior [*véase* «Mundos oscuros», por J. Feng y M. Trodden; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011]. Si la masa de estas partículas y la intensidad de sus interacciones se situasen en torno a la escala electrodébil, los cálculos muestran que las WIMP explicarían con facilidad las propiedades observadas en la materia oscura cósmica, como su abundancia. Esta aparición de la escala electrodébil en un marco completamente distinto ha recibido el nombre de «milagro WIMP».

En caso de existir, las partículas supersimétricas que solo experimentasen los efectos de la interacción débil constituirían un candidato ideal para las WIMP. Las esperanzas residen, sobre todo, en el más ligero de los neutralinos, los hipotéticos compañeros supersimétricos de los bosones electrodébiles y de la partícula de Higgs. Las posibilidades de detectar WIMP no se limitan al LHC. Dado que se trata de las partículas que componen la materia oscura presente en las galaxias, en estos momentos deberían estar atravesando todos los laboratorios de la Tierra. Así pues, otros experimentos repartidos por todo el mundo intentan detectar los sucesos, muy poco frecuentes, en los que una WIMP colisiona contra un núcleo atómico.

HORIZONTE CUÁNTICO

No cabe duda de que, gracias a la teoría cuántica de campos, entendemos de manera excelente una enorme cantidad de fenómenos microscópicos. Por otro lado, resulta imposible afirmar que el modelo estándar de la física de partículas esté completo. En los últimos años se ha avanzado en numerosos aspectos, sobre todo en el campo de la cromodinámica cuántica y la física de neutrinos, temas que apenas hemos tratado aquí. En nuestro viaje hacia escalas cada vez menores, hemos visto que las energías del orden del TeV constituyen un horizonte desde el que habremos de vislumbrar fenómenos nuevos, aunque «solo» se trate del descubrimiento del bosón de Higgs. Cuando Colón partió hacia el oeste, sabía que algo hallaría: como poco, una nueva ruta de navegación hacia las Indias Orientales. Pronto sabremos a qué nuevo continente de fenómenos desconocidos llegaremos en nuestro periplo hacia la escala del TeV. Ya se trate de partículas de materia oscura, el bosón de Higgs o nuevas interacciones, el LHC promete descifrarlos.

PARA SABER MÁS

¿Es supersimétrica la naturaleza? Howard E. Haber y Gordon L. Kane en *Investigación y Ciencia*, agosto de 1986.

Revolución en la física de partículas. Chris Quigg en *Investigación y Ciencia*, abril de 2008. También en **Universo cuántico**, Temas de Investigación y Ciencia, n.º 63, 2011.

Mundos oscuros. Jonathan Feng y Mark Trodden en *Investigación y Ciencia*, enero de 2011.



EN SÍNTESIS

Señales tomadas directamente del cerebro ya permiten controlar ordenadores y otras máquinas.

Los exoesqueletos, prótesis de cuerpo entero, también podrán conectarse al cerebro.

El control de máquinas mediante ondas cerebrales vaticina un día en el que se transferirán pensamientos.

Miguel A. L. Nicolelis es un precursor en el campo de la neuroprótesis. Es titular de la cátedra Anne W. Deane de neurociencias en la Universidad de Duke y fundador del Centro de Neuroingeniería en dicha universidad.



NEUROPRÓTESIS

Una mente extracorpórea

En este extracto de su nuevo libro, uno de los padres de la neuroprótesis vaticina un futuro en el que el control de ordenadores a través de ondas cerebrales permitirá caminar a los discapacitados y unir mentes en consciencias colectivas

Miguel A. L. Nicolelis

Durante tres decenios, casi cada vez que mis artículos científicos volvían a mis manos tras el obligado proceso de revisión experta, he recibido la recomendación de suprimir toda consideración especulativa sobre la posibilidad de conectar el cerebro a una máquina. Por regla general, los neurocientíficos encargados de la revisión no deseaban dar pábulo a sueños científicos más osados. Durante todo este tiempo, he fantaseado con el día en que me fuera posible rescatar todas esas ideas especulativas y exponerlas libremente a la consideración y valoración de los demás. Nuestros últimos progresos en el laboratorio indican que ese momento ha llegado.

Mientras yo me enfrentaba a la opinión ultraconservadora del mundo académico, algunos escritores y cineastas de ciencia ficción han especulado sobre el tema sin reparos y, en ocasiones, con excesivo deleite, gracias a la fecundidad de su imaginación. Tan solo en 2009, dos grandes producciones de Hollywood, *Los sustitutos* y *Avatar*, apelaban al estereotipo de científicos que controlan, lesionan, asesinan o conquistan merced a su magia tecnológica. En estos largometrajes, las interfaces cerebro-ordenador permitían a los seres humanos vivir, amar o luchar por medio de trasuntos suyos. Sus avatares de cuerpo completo cargaban con la penosa tarea de merodear por el universo y, en ocasiones, la de aniquilar a toda una raza extraterrestre en nombre de sus amos de carne y hueso.

Fragmento adaptado de *Beyond boundaries: The new neuroscience of connecting brains with machines — and how it will change our lives*, por Miguel Nicolelis. Publicado por convenio con Times Books, filial de Henry Holt and Company, LLC.

Permítanme exponer una perspectiva diferente sobre la próxima Era de las Máquinas. Después de trabajar y reflexionar durante largo tiempo sobre las consecuencias de los robots controlados mediante ondas cerebrales, denominados interfaces cerebro-ordenador, el futuro no se me antoja plagado de calamidades, sino rebosante de optimismo y expectativas entusiastas. Tal vez sea lo poco que podemos decir con certeza sobre ese futuro lo que me inclina a abrazar con tanta intensidad las asombrosas oportunidades que, para nuestra especie, supondría liberar a la mente de los límites del cuerpo. En vista de las impresionantes capacidades humanísticas que promete la investigación sobre las interfaces cerebro-ordenador, me pregunto cómo podría nadie pensar de otro modo.

Gracias a esta «liberación» del cerebro respecto a las restricciones físicas del cuerpo, los discapacitados podrán alzarse de sus sillas de ruedas. Pero hay más. Se avecina una era de redes neurosociales. Olvídese de Twitter y de los SMS. En ese futuro centrado en la mente, nuestro cerebro se comunicará de manera directa con el del compañero del despacho contiguo o con los de millones de seguidores a través de un nuevo medio, al que denomino «red cerebral». Flickr pertenecerá al pasado. Las imágenes mentales de aquel hermoso amanecer o las del equipo de fútbol de su ciudad natal se transmitirán, por medio de ondas cerebrales de radiofrecuencia, a una memoria digital de varios petaoctetos.

¿QUÉ TRAJE ME PONGO HOY?

Pero las ensoñaciones sobre la descarga o simulación de un cerebro completo en un ordenador nunca se harán realidad. La esencia de nuestra personalidad (lo que, por ejemplo, hace de Nelson Mandela un ser humano tan especial) nunca será trans-

ferible a una memoria informática. Sin embargo, experimentos realizados con roedores, simios y seres humanos han demostrado que es posible establecer una conexión directa entre máquina y cerebro. A partir de estos hallazgos, pronostico un futuro apasionante.

A lo largo de las próximas dos décadas, las interfaces cerebro-ordenador, construidas a partir de una conexión bidireccional que afecta a regiones extensas del cerebro, quizá permitan a las víctimas de enfermedades neurológicas devastadoras recuperar sus capacidades. Es probable que las primeras interfaces comiencen a devolver la funcionalidad a quienes han perdido el oído, la vista, el tacto, la capacidad ambulatoria o el habla. Estas personas podrían incluso lograr la inimaginable proeza de conversar valiéndose tan solo de ondas cerebrales.

El consorcio internacional de investigación Walk Again Project («camina de nuevo»), del que soy cofundador, permite vislumbrar ese futuro. El proyecto fue concebido hace pocos años, después de que mi grupo demostrase la viabilidad de conectar tejido encefálico vivo a una variedad de instrumentos. Su propósito consiste en desarrollar e implantar la primera interfaz cerebro-ordenador que devuelva por completo la movilidad a pacientes con parálisis grave, ya sea esta consecuencia de lesiones en la médula espinal o de enfermedades neurodegenerativas.

A tal fin, estamos diseñando y construyendo una neuroprótesis que permita a los discapacitados valerse de una interfaz cerebro-ordenador para controlar los movimientos de un exoesqueleto de cuerpo entero. Este «robot-vestimenta» dotará al paciente de un control voluntario de sus extremidades superiores e inferiores, sostendrá y transportará su cuerpo. Esta hazaña de neuroingeniería se basa en los principios neurofisiológicos que hemos deducido gracias a nuestros experimentos con interfaces cerebro-ordenador en monos Rhesus y otros animales.

En esos experimentos, una mona llamada Aurora aprendió a transmitir mediante una interfaz dónde deseaba situar el cursor de un ordenador. Llegó a realizar esta tarea con tanta naturalidad y fluidez como si estuviera utilizando un *joystick*. Después, llevamos a cabo con éxito el mismo experimento en pacientes con enfermedad de Parkinson grave. Algo más tarde, otro de los monos de mi laboratorio, en la Universidad de Duke, transmitió por Internet señales cerebrales para controlar el movimiento de las piernas de un robot en Japón.

Ahora hemos comenzado a trabajar en el sentido inverso, a fin de transmitir señales a la corteza cerebral de un mono. Hemos logrado que el animal sepa que una golosina, una bolita de comida, se encuentra en determinada caja y no en otra. Un proyecto futuro permitirá que un mono le comunique a otro la ubicación del alimento. Las neuroprótesis de nueva generación exigirán una comunicación bidireccional, tanto hacia el mundo exterior como recibida desde él. El cerebro del usuario tendrá que instruir a su pie biónico para que se eleve hasta el siguiente peldaño de una escalera, pero también habrá de recibir la información de que la prótesis ha tomado contacto con una superficie dura antes de enviar la orden de alzar el otro pie.



Exoesqueleto: Tal vez llegue el día en que un exoesqueleto controlado por ondas cerebrales permita caminar a los discapacitados.

PAUL SAKUMA/AP PHOTO

Una vez implantadas las conexiones de entrada y salida de señales con el mundo exterior, nos hallaremos en los umbrales de un futuro biónico. Las interfaces cerebrales se unirán a las extremidades robóticas más avanzadas del momento. Brazos y piernas robóticos se acoplarán, como bloques de Lego, a un torso biosintético. Este traje robótico, o exoesqueleto, se ajustará con suavidad al cuerpo de su portador y mantendrá una conexión directa con su corteza cerebral, el «centro de mando» del cerebro.

Para construir un exoesqueleto dotado de una interfaz cerebro-ordenador necesitaremos técnicas más avanzadas que las actuales. Hará falta una nueva generación de microelectrodos de alta densidad, que puedan implantarse sin riesgo en el cerebro y que efectúen registros fiables y duraderos de la actividad eléctrica de decenas de miles de neuronas repartidas en múltiples regiones cerebrales. De hecho, para que una interfaz resulte asequible y práctica desde un punto de vista médico, los registros a gran escala de la actividad cerebral deberían mantenerse estables, sin necesidad de intervenciones quirúrgicas, durante al menos un decenio.

También se implantarán de manera permanente neurochips específicos para cada individuo, a fin de que procesen las pautas eléctricas del cerebro y las conviertan en señales aptas para controlar el exoesqueleto. Para reducir el riesgo de infecciones y lesiones en la corteza cerebral, los neurochips deberán incorporar técnicas inalámbricas multicanal de baja potencia. Se transmitirá la información generada por miles de neuronas a una unidad de procesamiento, integrada en la indumentaria y del tamaño de un teléfono móvil. Esa unidad ejecutará simulaciones del funcionamiento interno del cerebro y optimizará la extracción inmediata de las señales cerebrales que desencadenan el movimiento.

Las poblaciones de neuronas que habrá que muestrear para alimentar la interfaz cerebro-ordenador pertenecerán a diversas regiones del cerebro. A partir de las señales sin procesar que se originan en las zonas responsables de las funciones motrices, se elaborará una señal digital que activará los elementos móviles de las articulaciones del esqueleto robótico. Otras señales neuronales interactuarán con el esqueleto para emular las funciones de la médula espinal. Ello permitirá al paciente dar un paso después de otro, avanzar con rapidez o lentitud, inclinarse hacia delante o subir unas escaleras. Mientras tanto, cerebro y máquina continuarán intercambiando información. Estas técnicas generarán una interacción continua entre las señales cerebrales y los reflejos robóticos.

También cabe imaginar sensores de fuerza y de elongación repartidos por todo el exoesqueleto. Estos generarían un flujo continuo de señales de retroalimentación para lograr tacto y propiocepción (la percepción de la posición del traje) artificiales, que mantengan al tanto al cerebro del paciente. Microestimuladores eléctricos enviarían las señales a la corteza. Otra posibilidad consiste en emplear señales ópticas que activen canales iónicos fotosensibles implantados en la corteza cerebral. Sobre

la base de nuestros experimentos con interfaces en monos, confío en que algunas semanas de entrenamiento basten para que el cerebro del paciente llegue a integrar el exoesqueleto como una extensión auténtica de la imagen corporal de su persona. A partir de ese momento, el paciente podrá utilizar el exoesqueleto controlado mediante la interfaz para moverse con libertad y autonomía por el mundo.

APLICACIONES NEURONALES

Si llegásemos a controlar todo tipo de ordenadores mediante las señales eléctricas del cerebro, ¿qué ocurriría pasados unos decenios? Ya se tratase de diminutos ordenadores personales sobre el cuerpo (o quizás en su interior) o de redes repartidas por lugares remotos con el objetivo de mediar nuestras relaciones sociales digitalizadas, la vida cotidiana sería muy distinta de la que conocemos.

En primer lugar, la interacción con el sistema operativo y los programas de nuestros ordenadores personales se convertiría en una aventura corporal: nuestra actividad cerebral serviría para asir objetos virtuales, activar programas, escribir informes y, sobre todo, para comunicarnos con total libertad con otros miembros de nuestra red cerebral favorita, una versión notablemente mejorada de las redes sociales actuales. El hecho de que Intel, Google y Microsoft ya hayan creado sus propias divisiones de investigación de interfaces cerebro-ordenador muestra que la idea no es descabellada. El principal obstáculo estriba en el desarrollo de un método no invasivo para el muestreo de la actividad cerebral. Por mi parte, confío en que una solución aparecerá de aquí a veinte años.

Llegado ese momento, lo que hoy se nos antoja impensable se convertirá en rutina. Los nuevos «humanos aumentados» harán sentir su presencia en una variedad de ambientes remotos por medio de sus avatares y de instrumentos controlados por el pensamiento. Desde las profundidades oceánicas hasta los confines de las supernovas o las diminutas hendiduras entre las células de nuestro cuerpo, por fin el alcance del ser humano igualará la voraz ambición de exploración de lo desconocido tan propia de nuestra especie. Es en este contexto donde veo a nuestro cerebro completar el viaje que comenzó en el obsoleto cuerpo que habita desde hace millones de años. Gracias a las interfaces bidireccionales gobernadas por el pensamiento, manejaremos una miríada de nanoinstrumentos que serán nuestros nuevos ojos, oídos y manos en la infinidad de mundos diminutos que la naturaleza ha creado.

En la escala de lo muy grande, es probable que podamos controlar a distancia a enviados y representantes virtuales, robots y aeronaves de las más variadas formas y tamaños. A nuestro servicio, explorarán otros planetas y estrellas en rincones remotos del universo, y pondrán al alcance de nuestros dedos mentales nuevas tierras y paisajes extraños y desconcertantes.

A cada paso, continuaremos asimilando como nuevas extensiones de nuestro yo los útiles que nuestros descendientes vayan creando para estos viajes de la mente. Ello definirá una visión del mundo y una forma de interactuar con él que trascenderá con mucho todo cuanto podamos imaginar hoy. La idea me provoca un enorme sentimiento de júbilo y sobrecogimiento; sin duda, semejante a la profunda emoción que debió experimentar aquel marino portugués que, hace 500 años, tras un viaje largo y arriesgado, se halló frente a las costas deslumbrantes y arenosas de un nuevo mundo.

¿Sería posible que una liberación tan completa del cerebro nos permitiera difuminar, o eliminar incluso, las fronteras corporales otrora inexpugnables que definen la individualidad del ser humano? ¿Acaso llegará el día en que, en un futuro lejano, nos integremos en una red de cerebros conscientes, en una auténtica red cerebral que piense de forma colectiva? Suponiendo que tal red se hiciese realidad, ¿podría el cerebro de cada participante no solo comunicarse con el resto mediante el pensamiento, sino también experimentar lo que sienten y perciben los demás miembros de esta verdadera «fusión de mentes»? Muy pocos osarían en la actualidad aventurarse en esas aguas desconocidas, pero es imposible saber cómo reaccionarían las generaciones venideras en caso de presentárseles la oportunidad.

Aceptemos que todos estos increíbles supuestos podrían hacerse realidad. Y demos por sentado que semejante fusión mental colectiva podría acabar admitiéndose, por parte de las generaciones futuras, como un medio ético para relacionarse y compartir su humanidad. ¿Podrían nuestros descendientes despertarse una mañana y percatarse de que han engendrado plácidamente una especie humana totalmente distinta? No resulta inconcebible que nuestra progenie llegue un día a dominar las técnicas y la ética necesarias para establecer una red cerebral funcional, un medio a través del cual miles de millones de seres establezcan, por consenso, contacto con sus semejantes únicamente a través del pensamiento.

A día de hoy, ni yo ni nadie podemos visualizar el aspecto ni los sentimientos que experimentará un coloso semejante de consciencia colectiva. Tal vez, sin que lo sospechemos, ofrezca la experiencia de la percepción definitiva: el descubrimiento de que ninguno de nosotros se encuentra solo, de que nuestros más íntimos pensamientos, experiencias, angustias, pasiones y deseos —esa sustancia primordial que nos define como humanos— pueden ser compartidos por miles de millones de hermanos.

Apenas se requiere un pequeño salto de la imaginación para pensar que, inmersa en su recién adquirida sabiduría, nuestra progenie quizá se decida a cruzar otro Rubicón en la historia de la especie y se esfuerce en documentar, en favor de las generaciones futuras y de la posteridad del cosmos, la riqueza y diversidad del legado humano. Para recopilar tan inestimable tesoro, se me ocurre que habría que preservar la irremplazable narrativa que se formula, en primera persona, en cada una de nuestras vidas. Para ello, habría que transferir a un medio de almacenamiento digital la memoria de cada individuo. Tal proceder pondría a salvo el relato único que constituye nuestra existencia mortal; uno que, tras una breve permanencia en la propia mente, en un derroche insólito de la naturaleza se pierde irremisiblemente al concluir nuestra vida.

Mientras dure mi carrera profesional, espero que soñar tan a lo grande ayude a hacer realidad esta visión: una trayectoria que va desde el control mental de ordenadores, ya posible, a la confección de exoesqueletos y, quizás, al envío de mensajes cerebrales. Los tiempos que he pasado en las trincheras de la ciencia conocerían una divertida coda si, por fin, pudiera responder a un revisor quisquilloso implantando en su corteza auditiva el tipo exacto de réplica que durante decenios he estado tratando de expresar.

PARA SABER MÁS

Control cerebral de robots. Miguel A. L. Nicolelis y John K. Chapin en *Investigación y Ciencia*, diciembre de 2002.

En busca del código neural. Miguel A. L. Nicolelis y Sidarta Ribeiro en *Investigación y Ciencia*, febrero de 2007. También en **El cerebro, hoy**, Temas de Investigación y Ciencia n.º 57, 2009.

BIOLOGÍA

La vida interior del genoma

La forma en que los genes se organizan y desplazan en el núcleo celular determina en gran medida el funcionamiento de los mismos, sea este normal o patológico

Tom Misteli

EN SÍNTESIS

Los cromosomas no se distribuyen de forma aleatoria en el núcleo, sino que tienden a ocupar posiciones concretas.

Esta organización nuclear refleja el estado funcional de cada cromosoma y de los genes que alberga. La organización puede variar según la actividad de la célula y durante la enfermedad.

La descripción de la posición de los genes en el núcleo y la modificación de esta en condiciones diversas está arrojando luz sobre el funcionamiento de las células normales y el origen de algunas enfermedades, como el cáncer.





Los cromosomas de una célula en división (*izquierda*) están duplicados y ofrecen un aspecto compacto. Sin embargo, durante el resto del tiempo se hallan separados y más expandidos (*abajo*). Hasta la reciente llegada de las técnicas de «pintado cromosómico» resultaba muy difícil distinguir un cromosoma expandido de otro.

ANATOMY BLUE

Tom Misteli es investigador del Instituto Nacional del Cáncer en Bethesda, Maryland. Mediante técnicas de obtención de imágenes que él mismo ha desarrollado, su laboratorio pretende revelar los principios fundamentales de la organización tridimensional del genoma en el núcleo celular y aplicar este conocimiento al descubrimiento de nuevas estrategias con las que afrontar el cáncer y el envejecimiento.



HACE DIEZ AÑOS, LA PUBLICACIÓN DE LA SECUENCIA DEL GENOMA humano proporcionó al mundo las bases sobre las que se construía un ser humano. Pero del mismo modo que una lista de piezas de automóvil no nos indica el funcionamiento del motor, la secuencia genómica completa (la lista de «letras» del ADN que forma los cromosomas de las células humanas) no nos reveló la manera en que el genoma dirige la actividad cotidiana de nuestras células o controla el desarrollo de un óvulo fecundado hasta convertirse en un adulto funcional.

Para abordar esa cuestión, junto con investigadores del nuevo campo de la biología celular genómica, estamos estudiando la disposición de los cromosomas, y los genes que albergan, en el espacio tridimensional del núcleo, así como el efecto de esa organización en su funcionamiento.

Mediante nuevas técnicas de obtención de imágenes tridimensionales que nos permiten desentrañar el interior de la célula viva, hemos descubierto un ecosistema tremendamente dinámico. En el núcleo, los cromosomas interaccionan físicamente con cromosomas vecinos, los genes de esos cromosomas migran a distintos lugares nucleares según su cometido y las moléculas que regulan la actividad génica se congregan en bulliciosas centralitas. Los hallazgos recientes nos ofrecen conocimientos de primera mano sobre la función del genoma en el mantenimiento de nuestra salud y el origen de algunas enfermedades, entre ellas ciertos tipos de cáncer; también pueden dar lugar a nuevos métodos para el diagnóstico de enfermedades.

CUESTIONES PRELIMINARES

Los recientes progresos son el resultado de descubrimientos llevados a cabo en la década de los ochenta. Por aquel entonces, se sabía que los cromosomas sufrían una intensa condensación durante la división celular, momento en que adoptaban la forma característica de reloj de arena. También se había observado en ellos una estructura más relajada cuando las células realizaban sus funciones normales y no se estaban dividiendo. Ese aspecto laxo hacía difícil la distinción entre cromosomas aunque se utilizasen los mejores microscopios. Se aceptaba la idea de que, en las células que no se estaban dividiendo, los cromosomas se entremezclaban igual que espaguetis amontonados en un bol.

Esa era la opinión prevaleciente a pesar de que existían algunos indicios en contra. A principios del siglo XX, el citólogo Theodor Boveri rechazó el «modelo de los espaguetis» para definir la organización de los cromosomas. Basándose en estudios de un gusano cilíndrico que infecta a los caballos, dedujo que, aunque los cromosomas experimentan cambios de tamaño y forma durante la vida de una célula, cada uno de ellos ocupa una región distinta y bien definida en el núcleo. Denominó «territorios cromosómicos» a las regiones habitadas por los distintos cromosomas. Pero como resultaba difícil observar estos últimos —y dado que los gusanos cilíndricos de Boveri no constituían un sistema experimental habitual—, su concepto de territorios cromosómicos permaneció ignorado durante largo tiempo.

Las pruebas experimentales que respaldaron la idea de los territorios cromosómicos no llegaron hasta que los hermanos Thomas y Christoph Cremer desarrollaron un método para marcar y visualizar el material genético de una pequeña región del núcleo. A principios de los años ochenta, demostraron que cuando un rayo láser incide sobre el ADN en una determinada región del núcleo, solo unos pocos cromosomas resultan marcados. Si el ADN nuclear se hallase tan amontonado como se creía, cada pulso de rayo láser habría incidido sobre un número mucho mayor de cromosomas.

Pocos años después, los investigadores perfeccionaron un método más colorido y mejor dirigido para marcar y visualizar cromosomas enteros. Mediante la técnica de «pintado cromosómico» se añadía un marcador fluorescente a secuencias de letras del ADN de cromosomas individuales. Cada cromosoma se marcaba con una molécula fluorescente distinta para poder determinar su ubicación. Estos estudios demostraron claramente que los cromosomas se presentaban en el núcleo como entidades discretas, ocupando un espacio separado de los demás.

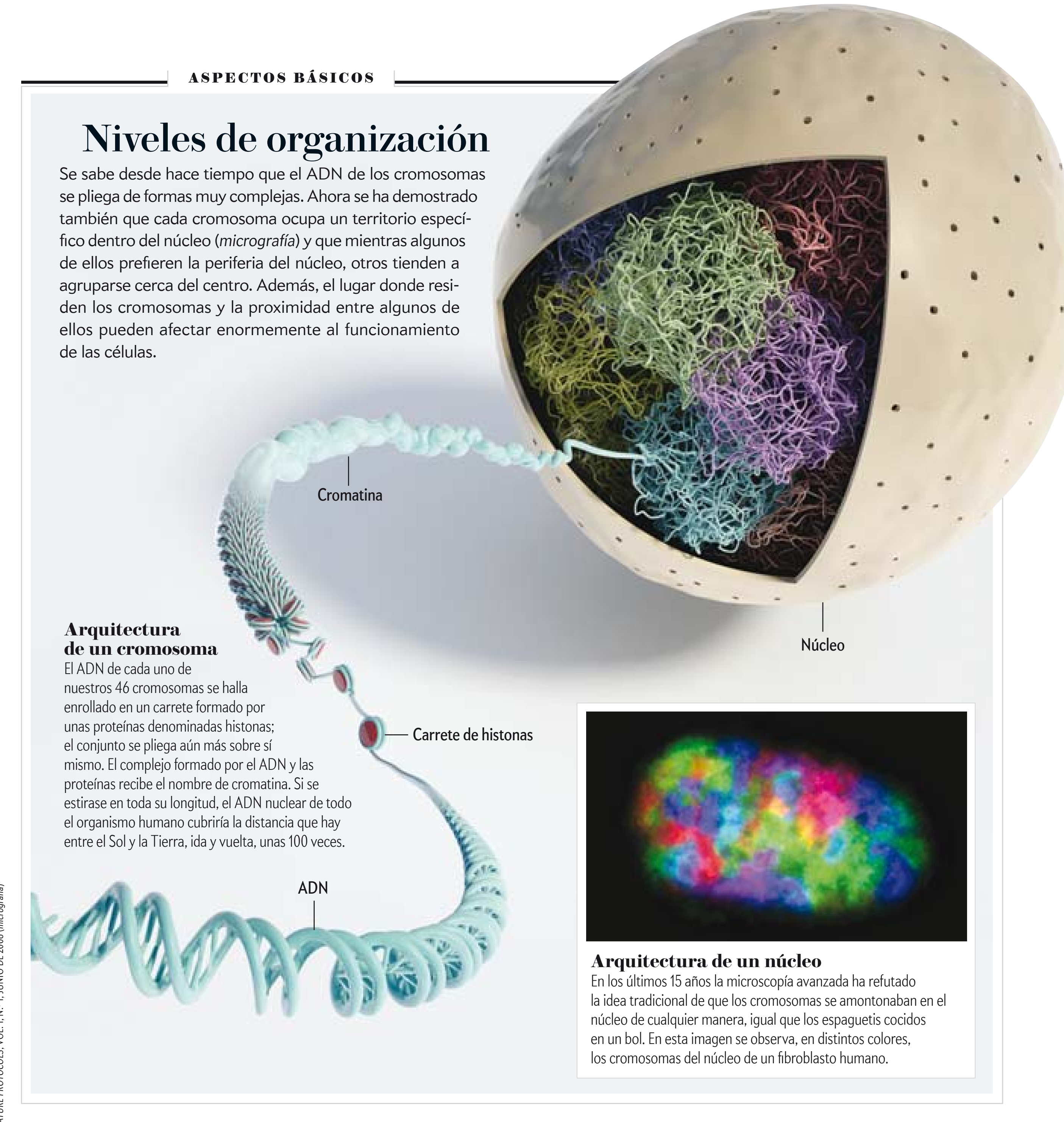
Ese descubrimiento abrió numerosos interrogantes que hoy en día se están abordando. ¿Se reparten los cromosomas de manera aleatoria por todo el núcleo? ¿O tienen un lugar asignado en el mismo? Y lo que es más importante, ¿afecta su posición a la actividad de los genes que albergan?

AFINIDAD ENTRE CROMOSOMAS

Ahora sabemos que cada cromosoma tiende a ocupar una posición concreta en el núcleo. En los leucocitos humanos, el cromosoma 18 suele hallarse pegado a la pared externa del núcleo, mientras que el cromosoma 19 prefiere permanecer en el centro; entre tanto, el cromosoma 7 tiende a quedarse flotando entre los dos. La predilección de cada cromosoma por una posición más cercana o lejana a la periferia nuclear crea distintos grupos de cromo-

Niveles de organización

Se sabe desde hace tiempo que el ADN de los cromosomas se pliega de formas muy complejas. Ahora se ha demostrado también que cada cromosoma ocupa un territorio específico dentro del núcleo (*micrografía*) y que mientras algunos de ellos prefieren la periferia del núcleo, otros tienden a agruparse cerca del centro. Además, el lugar donde residen los cromosomas y la proximidad entre algunos de ellos pueden afectar enormemente al funcionamiento de las células.



Arquitectura de un cromosoma
El ADN de cada uno de nuestros 46 cromosomas se halla enrollado en un carrete formado por unas proteínas denominadas histonas; el conjunto se pliega aún más sobre sí mismo. El complejo formado por el ADN y las proteínas recibe el nombre de cromatina. Si se estirase en toda su longitud, el ADN nuclear de todo el organismo humano cubriría la distancia que hay entre el Sol y la Tierra, ida y vuelta, unas 100 veces.

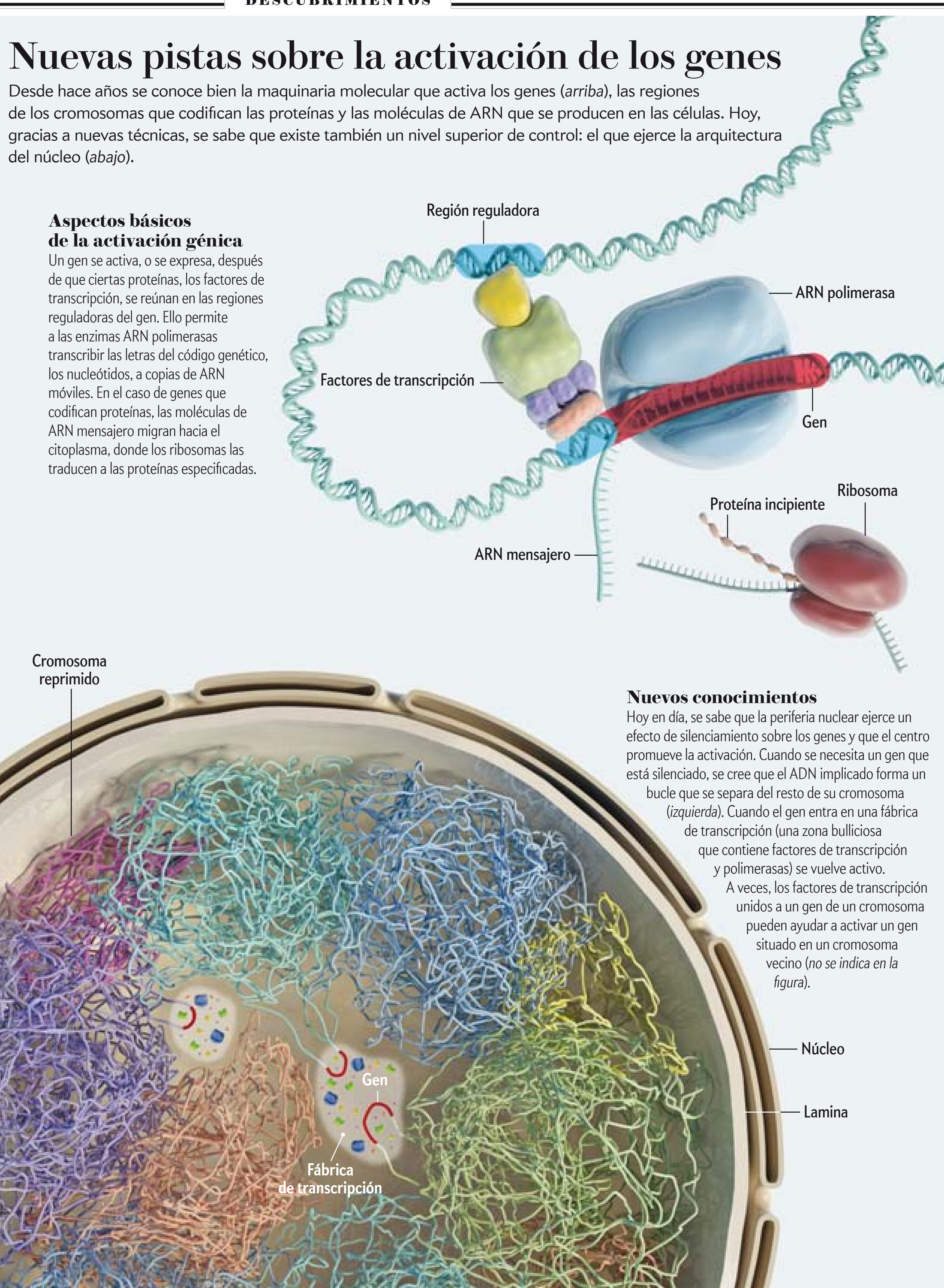
Arquitectura de un núcleo
En los últimos 15 años la microscopía avanzada ha refutado la idea tradicional de que los cromosomas se amontonaban en el núcleo de cualquier manera, igual que los espaguetis cocidos en un bol. En esta imagen se observa, en distintos colores, los cromosomas del núcleo de un fibroblasto humano.

ANATOMY BLUE; DE «COBRA: COMBINED BINARY RATIO LABELING OF NUCLEIC-ACID PROBES FOR MULTI-COLOR FLUORESCENCE IN SITU HYBRIDIZATION KARYOTYPING», POR KAROLY SZUHAI Y HANS J. TANKE, EN *NATURE PROTOCOLS*, VOL. 1, N.º 1; JUNIO DE 2006 (*micrografía*)

somas afines. Cada cromosoma presenta una serie de vecinos que suele mantener en todas las células, siempre y cuando estas sean del mismo tipo. En estudios realizados con leucocitos de ratón mi equipo identificó así que el cromosoma 12 se asociaba con frecuencia a los cromosomas 14 y 15.

Sin embargo, las posiciones de los cromosomas no son inmutables. Mi laboratorio descubrió que los cromosomas se distribuían de manera distinta en diversos tipos celulares. Otros investigadores han demostrado que esas posiciones varían durante el desarrollo y en la enfermedad. Y no solo eso, el lugar donde reside un cromosoma parece influir en la activación o desactivación de los genes que contiene.

Tal efecto se dedujo tras observar un cambio de actividad de los genes al modificar estos su posición, como sucedió durante el estudio del gen *GFAP*. Por lo general, los astrocitos, células del cerebro con forma de estrella, poseen una copia activa de ese gen (la que sintetiza la proteína codificada) y una copia silente, inactiva. En mi laboratorio, Takumi Takizawa descubrió que normalmente la versión silente se ubica en la periferia del núcleo, mientras que la copia activa reside en el interior de este. Otros expertos han descubierto un posicionamiento similar en los genes que codifican los anticuerpos defensivos, o inmunoglobulinas, que segregan los leucocitos ante un organismo invasor. En los leucocitos en estado de alerta por la presencia de células foráneas, la región del cromosoma que alberga al gen *IGH* (que codifica uno de los componentes de la inmunoglobulina) tiende a desplazarse hacia el centro del núcleo. Estos descubrimientos han puesto de manifiesto una sencilla regla sobre



Nuevas pistas sobre la activación de los genes

Desde hace años se conoce bien la maquinaria molecular que activa los genes (*arriba*), las regiones de los cromosomas que codifican las proteínas y las moléculas de ARN que se producen en las células. Hoy, gracias a nuevas técnicas, se sabe que existe también un nivel superior de control: el que ejerce la arquitectura del núcleo (*abajo*).

Aspectos básicos de la activación génica

Un gen se activa, o se expresa, después de que ciertas proteínas, los factores de transcripción, se reúnan en las regiones reguladoras del gen. Ello permite a las enzimas ARN polimerasas transcribir las letras del código genético, los nucleótidos, a copias de ARN móviles. En el caso de genes que codifican proteínas, las moléculas de ARN mensajero migran hacia el citoplasma, donde los ribosomas las traducen a las proteínas especificadas.

Nuevos conocimientos

Hoy en día, se sabe que la periferia nuclear ejerce un efecto de silenciamiento sobre los genes y que el centro promueve la activación. Cuando se necesita un gen que está silenciado, se cree que el ADN implicado forma un bucle que se separa del resto de su cromosoma (*izquierda*). Cuando el gen entra en una fábrica de transcripción (una zona bulliciosa que contiene factores de transcripción y polimerasas) se vuelve activo. A veces, los factores de transcripción unidos a un gen de un cromosoma pueden ayudar a activar un gen situado en un cromosoma vecino (*no se indica en la figura*).

ANATOMY BLUE

la manera en que la posición de un gen influye en su propia función: con frecuencia, los genes situados en la periferia del núcleo son inactivos.

¿Habrá algo en las regiones externas del núcleo que favorezca el silenciamiento génico? Uno de los primeros indicios de que podría ser así se remonta a los años treinta, cuando se observó que la periferia del núcleo se hallaba revestida de heterocromatina (regiones cromosómicas muy condensadas). Un cromosoma consta de una doble hélice de ADN enrollada en una especie de carrete formado por unas proteínas, las histonas; el conjunto se pliega sobre sí mismo y da lugar a una gruesa fibra, la cromatina. A su vez, las fibras de cromatina se pliegan aún más, con lo que se vuelven más condensadas. La heterocromatina representa una forma de cromatina con un enrollamiento muy compacto, una disposición que tiende a evitar que las proteínas que leen los genes accedan al ADN subyacente.

Por supuesto, esa observación preliminar no permitía esclarecer si la periferia favorecía el silenciamiento o si la cromatina compacta resultaba atraída hacia esas regiones por otros motivos. Pero una serie de experimentos llevados a cabo por diversos laboratorios en 2008 respaldó la primera idea. Cuando los investigadores apartaban a los genes activos de sus posiciones habituales en el núcleo y los anclaban a la membrana nuclear, su actividad se veía, por lo general, reducida. Por tanto, la periferia del núcleo ayuda a mantener el estado silente, por lo menos en algunos genes.

El interior del núcleo, por su parte, también podría contribuir a la función de los cromosomas y genes, cuya actividad se necesita de forma rápida y frecuente. Esa zona aporta conjuntos de conglomerados proteicos, las fábricas de transcripción. Entre ellos se incluyen las polimerasas (enzimas que transcriben el ADN en ARN, que posteriormente se traduce en una proteína), así como factores de transcripción (proteínas que se unen a las regiones reguladoras de los genes y ponen en marcha las polimerasas).

Peter Cook, de la Universidad de Oxford, propuso en 1993 la existencia de esas fábricas, tras darse cuenta de que, en todo momento, el número de genes activos en el núcleo superaba en gran medida al número de lugares en los que las polimerasas se hallaban leyendo genes. Esa pauta podría interpretarse como la agrupación de múltiples genes en centralitas de actividad transcripcional donde se compartirían las polimerasas y los factores de transcripción. La idea ya tenía precedentes: cientos de genes que codifican los ARN ribosómicos (elementos de la maquinaria celular que sintetiza las proteínas) se transcriben de forma conjunta en el nucleolo, una subestructura nuclear lo bastante grande para observarse al microscopio.

Los cromosomas se distribuyen de manera diferente en distintos tipos celulares y a lo largo del desarrollo. El lugar que ocupa un cromosoma parece influir en la activación o desactivación de los genes que contiene

INFLUENCIA EN LA SALUD

La biología celular genómica aún no conoce todas las reglas que gobiernan la actividad de los genes en distintas partes del núcleo. Sin embargo, se ha demostrado que la ubicación de los genes en el núcleo tiene relevancia en el desarrollo normal y la salud.

Un ejemplo llamativo de la reorganización génica durante el desarrollo embrionario procede de los estudios de células madre embrionarias. Estas células son «pluripotentes», es decir, poseen la singular capacidad de diferenciarse en cualquiera de los aproximadamente 220 tejidos especializados del organismo, como las neuronas, las células sanguíneas o las fibras musculares. A diferencia de las células totalmente diferenciadas, las células madre embrionarias carecen de las amplias regiones de heterocromatina donde los genes se encuentran silenciados. Tampoco poseen laminas, unas proteínas que ayudan a anclar el ADN inactivo a la periferia del núcleo. Como resultado, casi todos los genes de una célula madre presentan un nivel de actividad reducido.

Cuando las células madre embrionarias reciben una señal para diferenciarse, por ejemplo, en células óseas o en neuronas, su arquitectura nuclear se modifica de manera espectacular. Aparecen las laminas, que se unen entre sí y forman un manto estrechamente entrelazado, la lamina nuclear, que se sitúa por debajo de la membrana nuclear. Se cree que esta lamina de soporte mantiene la forma del núcleo y protege a los cromosomas de la presión mecánica externa. Pero también parece estar implicada en la regulación normal de los genes. Los segmentos cromosómicos con menos genes activos contienen cierta proteína estructural que comprime esas regiones y las convierte en heterocromatina; a continuación las une a las laminas de la periferia del núcleo. Ese secuestro hace que las regiones ricas en genes se sitúen más cerca del interior y de la maquinaria que los activa. Por tanto, la aparición de las laminas durante el desarrollo embrionario permite a las células desactivar los genes que ya no hacen falta, que se confinan al extrarradio.

Al observar lo que ocurre cuando hay un defecto en la laminas se refuerza la importancia de la descentralización de determinadas regiones cromosómicas para el funcionamiento correcto de los genes en las células diferenciadas. Las mutaciones en las laminas dan lugar a una serie de enfermedades, como la distrofia muscular, trastornos neurológicos y envejecimiento prematuro. Esas laminopatías resultan inusuales por su amplitud: a diferencia de la mayoría de las enfermedades, en las que una mutación en un gen da lugar a un trastorno concreto, las mutaciones en las laminas originan un espectro muy diverso de patologías. No se sabe con exactitud la manera en que las laminas defectuosas provocan estos trastornos. Tal vez den lugar a una debilitación de la lamina nuclear, lo que dejaría vulnerable al núcleo frente a fuerzas mecánicas. Como consecuencia, el genoma resultaría dañado y la célula podría perecer. Otra posibilidad sería que las laminas defectuosas perdieran la capacidad de organizar el genoma, con lo que colocarían genes en los lugares erróneos y alterarían su función.

Los estudios que han cartografiado las posiciones de los cromosomas en células de pacientes con laminopatías tienden a respaldar esta última idea. Se ha demostrado así la reubicación aberrante de los cromosomas 13 y 18 (desde la periferia hacia el interior) en células con una mutación asociada a esas patologías. Pero todavía no se ha aclarado si la redisposición de los cromosomas es consecuencia de la enfermedad o constituye uno de los factores que contribuyen a ella.

En algunos tipos de cáncer resulta más claro el papel crucial de la posición cromosómica. A menudo, las células malignas presentan «translocaciones» cromosómicas, una aberración que

aparece cuando un fragmento se desprende de un cromosoma y acaba uniéndose a otro. En algunos casos, esas translocaciones provocan un cáncer porque la fusión da lugar a un gen mutante que favorece una proliferación celular excesiva; en otros casos, resultan intrascendentes.

El hecho de que un cromosoma se combine con otro y forme una translocación parece depender de la ubicación de los cromosomas en el núcleo: los cromosomas que se hallan juntos tienden a fusionarse con mayor frecuencia. Consideremos el linfoma de Burkitt. Muchos pacientes con esa enfermedad presentan una translocación entre el gen *MYC*, alojado en el cromosoma 8, y el gen *IGH*, en el cromosoma 14; en contadas ocasiones, *MYC* se transloca con otro gen que también codifica una inmunoglobulina en el cromosoma 2, el gen *IGK*; y aún más raramente se fusiona con el gen *IGL*, situado en el cromosoma 22. En 2003, Jeffrey Roix, de mi laboratorio, descubrió que, dentro del núcleo, la distancia media entre *MYC* y los tres genes con los que se translocaba se correspondía de manera precisa con la frecuencia de la alteración. Ello indica que existe una relación entre la distancia entre los genes y la probabilidad de translocación. A partir de entonces se ha observado esta relación en otros tipos de cáncer.

Mi laboratorio también ha demostrado que cuando un cromosoma se rompe, los extremos dañados permanecen cerca de su sitio y no se alejan mucho de la región donde se situaban antes de la rotura. Esta observación explica la mayor probabilidad de fusión de los cromosomas agrupados en la misma vecindad con respecto a la de los cromosomas distantes. También aclara el hecho de que determinadas translocaciones se observen en un cáncer de un tejido pero no de otro, ya que los cromosomas están distribuidos de distinta forma en los diversos tejidos. Por tanto, resultará más probable que los cromosomas próximos entre sí en las células renales experimenten translocación en los tumores renales que en el cáncer de otros tejidos, como los leucocitos, donde esos cromosomas se hallan más apartados unos de otros.

Uno de los avances más fascinantes ha sido darse cuenta de que el conocimiento de la posición habitual de los cromosomas en el núcleo podría contribuir a detectar el cáncer

Uno de los avances más fascinantes en este campo ha sido darse cuenta de que el conocimiento de la posición habitual de los cromosomas en el núcleo podría contribuir a detectar el cáncer. Los experimentos preliminares han demostrado que la ubicación de los genes podría indicar si una célula es cancerosa. En un estudio piloto sobre el cáncer de mama realizado en mi laboratorio, Karen Meaburn ha identificado varios genes con una posición distinta entre las células tumorales y las células de tejido mamario normal. Esos genes resultaron unos buenos marcadores del cáncer de mama, ya que nos permitieron reconocer las muestras de tejido canceroso con una precisión muy elevada. En las células malignas, algunos genes cambian de posición incluso antes de que las células empiecen a funcionar mal. Por tanto, esperamos que algún día los análisis de la posición de los genes se conviertan en una poderosa herramienta molecular que ayude a diagnosticar el cáncer en etapas muy tempranas.

EL NÚCLEO AUTOORGANIZADO

El enigma fundamental de la biología celular genómica es saber lo que determina la posición de un gen o de un cromosoma en el núcleo ¿Cómo saben los genes y los cromosomas hacia dónde ir? y ¿cómo consiguen llegar hasta allí a medida que las células donde residen se van diferenciando y especializando en los diversos tejidos?

Se ha planteado que las secuencias cromosómicas podrían ser escoltadas por una maquinaria celular específica hasta su posición correcta. Quizás una proteína de fijación al ADN, que reconoce una secuencia génica determinada, se una a esta última y, a continuación, con la ayuda de una proteína que actúe como un motor molecular, arrastre esa región del cromosoma hacia un lugar concreto del núcleo. Pero hasta ahora nadie ha identificado un sistema semejante. Y resulta difícil imaginar un mecanismo de señalización que indique un conjunto de coordenadas geográficas a un fragmento de ADN y que dirija un gen hacia el centro del núcleo o hacia su maquinaria de transcripción favorita.

En vez de ello, hemos propuesto la idea de una autoorganización de la posición nuclear, algo parecido a lo que ocurre con los estudiantes de secundaria, que forman pandillas porque se sienten atraídos por intereses comunes, no porque sus padres o profesores les hayan dado instrucciones para asociarse. Del mismo modo, la localización de los genes y de los cromosomas en el interior del núcleo surge como resultado de su actividad y no está determinada por ningún mecanismo de organización externo. A su vez, esta ubicación influye sobre su actividad posterior.

¿Cómo funcionaría esa autoorganización? Veamos lo que sucede en un núcleo cuando el gen de una célula diferenciada se activa en respuesta a una señal, como la de una hormona. Antes de que la señal llegue a la célula, el gen se halla inactivo; probablemente se oculte en una región de cromatina condensada, quizás en un bloque de heterocromatina asociado a la periferia nuclear. Cuando la señal llega al núcleo, ciertas moléculas, los remodeladores de la cromatina, desenrollan el ADN condensado en el gen y su alrededor y hacen esa zona más accesible a la maquinaria transcripcional. En un núcleo autoorganizado, esta relajación permitiría la formación de un bucle de cromatina que sobresaldría de la heterocromatina ubicada en la periferia. El bucle errante merodearía por nuevas regiones del núcleo y acabaría estableciendo contacto con una fábrica de transcripción.

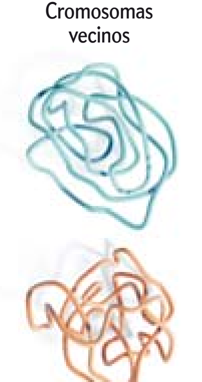
Hay que señalar que este movimiento del gen —desde las afueras del núcleo hacia el centro, donde se desarrolla la acción— tiene lugar sin la ayuda de ninguna maquinaria de transporte diseñada al efecto y está dirigida totalmente por la actividad del gen. Este modelo presenta una interesante consecuencia: sugiere que aunque la localización nuclear de un gen no sea aleatoria, la forma de llegar hasta allí sí puede serlo.

El concepto de autoorganización concuerda con numerosos resultados de experimentos de rastreo genético. Los genes pueden formar bucles que se alejan del cromosoma y se desplazan por todo el núcleo. Algunos de ellos incluso llevan al extremo estas escapadas transcripcionales. Cuando las hormonas denominadas citoquinas estimulan los leucocitos, los genes que codifican unas proteínas del sistema inmunitario (las moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad de clase II) se alejan bastante del cuerpo del cromosoma en el que se ubican, y en ocasiones se extienden por medio núcleo.

Una característica distintiva de cáncer

Ciertos tipos de cáncer surgen cuando en una célula se rompen dos cromosomas (quizás a causa de radiaciones o de toxinas) y posteriormente se unen entre sí de manera inapropiada formando una combinación aberrante, o translocación. En el linfoma de Burkitt se ha identificado una translocación entre el gen *MYC* del cromosoma 8 y el gen *IGH* del cromosoma 14 de las células B del sistema inmunitario. Hasta hace poco no estaba claro por qué algunas translocaciones solo tenían lugar en determinados tipos celulares. Pero estudios recientes indican que la respuesta reside en la proximidad de los cromosomas: los cromosomas cercanos entre sí se combinan con mayor frecuencia que los que están separados. En las células B, los cromosomas 8 y 14 suelen ser vecinos.











El mismo principio puede gobernar el posicionamiento de cromosomas enteros. Aunque la mayoría de los genes se desplaza poco, cada uno de ellos contribuye a que su cromosoma alcance su lugar definitivo en la célula. Por tanto, si la autoorganización es la norma, un cromosoma que contenga en su mayor parte genes inactivos se verá empujado hacia las regiones más represivas de la periferia nuclear, mientras que un cromosoma con una mayoría de los genes activos será arrastrado hacia el centro del núcleo.

Para comprobar tal predicción, el grupo de Mark Groudine, del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, en Seattle, obtuvo células precursoras de la sangre y, a continuación, provocó su maduración. Las células se recogieron en distintos momentos y se midió en ellas la actividad de varios miles de genes. Al mismo tiempo, determinaron la posición de los cromosomas donde se albergaban los genes. El resultado: los cromosomas que contenían el mayor número de genes cuya actividad variaba al madurar las células fueron los que más se desplazaron.

Aunque representan un buen punto de partida, esos experimentos conllevan bastante dificultad: resulta tedioso identificar con el microscopio la posición de numerosas regiones genómicas a la vez. Puede que una técnica revolucionaria alivie pronto este problema. El método Hi-C, desarrollado por Job Dekker, de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts, permite obtener en poco tiempo una instantánea de la arquitectura tridimensional del genoma al enlazar químicamente todas las regiones cromosómicas que se hallan en contacto en el núcleo. Mediante esa técnica pronto se podrá determinar la localización de los cromosomas en núcleos de distintos tejidos, a diferentes tiempos y sometidos a condiciones diversas. Tras la comparación de esos patrones con los conjuntos de genes activos e inactivos, se podrán adquirir nuevos conocimientos sobre el efecto de la organización nuclear en la función de la célula y el modo en que su alteración puede contribuir a la enfermedad.

La elaboración del primer borrador de la secuencia del genoma humano supuso unos diez años de esfuerzo enorme. La biología celular genómica, al intentar ir más allá de la información que aporta la secuencia por sí sola, está empezando a desentrañar el modo en que se comportan los genomas en la célula, su hábitat natural. Esta tarea, aunque estimulante, es monumental. Dada su complejidad, probablemente mantenga ocupados a los biólogos mucho más tiempo del que se empleó para secuenciar el genoma humano.

ANATOMY BLUE

PARA SABER MÁS

The cell nucleus and aging: Tantalizing clues and hopeful promises. Paola Scaffidi, Leslie Gordon y Tom Misteli en *PLoS Biology*, vol. 3, n.º 11, pág. e395, noviembre de 2005.

Cell biology: Chromosome territories. Karen J. Meaburn y Tom Misteli en *Nature*, vol. 445, págs. 379-381, 25 de enero de 2007.

Beyond the sequence: Cellular organization of genome function. Tom Misteli en *Cell*, vol. 128, n.º 4, págs. 787-800, febrero de 2007.

Dynamic genome architecture in the nuclear space: Regulation of gene expression in three dimensions. Christian Lanctôt et al. en *Nature Reviews Genetics*, vol. 8, n.º 2, págs. 104-115, febrero de 2007.

Comprehensive mapping of long-range interactions reveals folding principles of the human genome. Erez Lieberman-Aiden et al. en *Science*, vol. 326, págs. 289-293, 9 de octubre de 2009.

The nucleus. Dirigido por Tom Misteli y David L. Spector. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2010.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Tan rápido, tan alto, tan fuerte

La diversidad de las marcas de atletismo es solo aparente. Muchas resultan de la potencia bien aprovechada de un único músculo: el cuádriceps

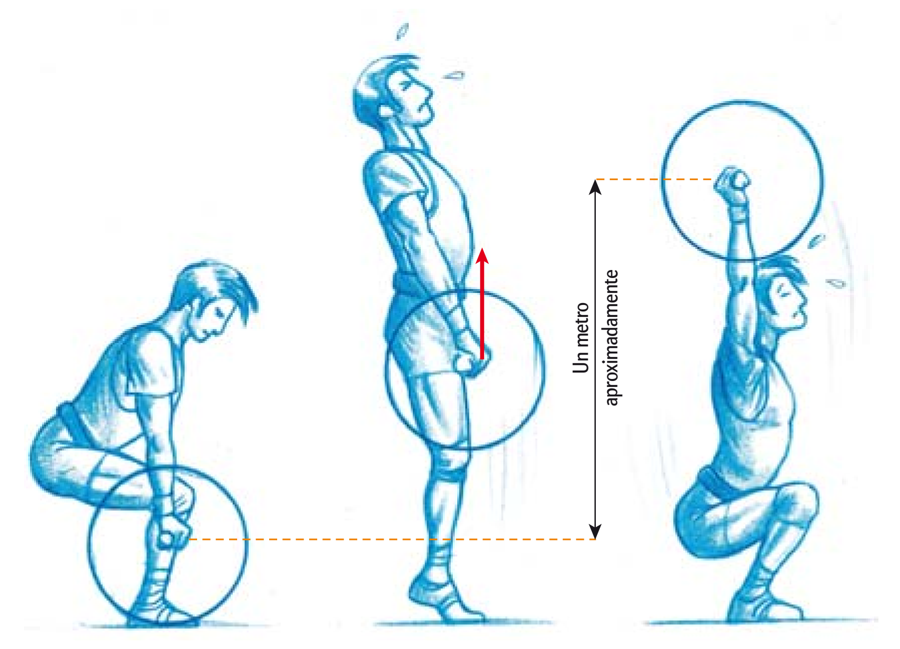
Cien metros en diez segundos, saltos con pértiga de seis metros, nueve metros en salto de longitud, etcétera. Los atletas del *sprint* y del salto nos sorprenden. ¡Y además unos halterófilos que levantan dos veces su peso! Sin embargo, tras esa diversidad de cifras y disciplinas deportivas se esconde un denominador común: el cuádriceps. Este músculo, situado en la cara anterior del muslo, es el más potente de nuestro organismo y determina nuestras prestaciones óptimas durante los esfuerzos breves e intensos.

¿Cómo evaluar la energía que puede desarrollar el cuádriceps? Dejemos de lado los deportes que solicitan de forma simultánea a una gran variedad de músculos y centrémonos en la halterofilia. Uno de los dos movimientos de esta disciplina es la arrancada: el atleta se halla inicialmente en cuclillas y con los brazos bien extendidos, se endereza y luego desciende antes de levantarse enseguida.

En ese esfuerzo, actúan solo los músculos de los muslos; el resto del cuerpo se limita a seguir el movimiento. Durante la primera etapa, antes de alzarse, el levantador contrae los cuádriceps una única vez. Levanta la barra y las pesas hasta una altura equivalente a la pierna acuclillada y les imprime una velocidad suficiente para que se eleven hasta poco más de un metro. Con los halterios de 173 kilogramos (récord mundial en la categoría de menos de 77 kilogramos), el atleta habrá gastado una energía de unos 1700 julios, o sea, 850 julios por cuádriceps.

¿Es aceptable esa estimación? Para averiguarlo realicemos un brinco vertical, es decir, un salto hacia arriba sin flexión de impulso. Si toda la energía citada se convirtiese en energía potencial gravitatoria, un hombre de 80 kilogramos saltaría a una altura de dos metros. Parece mucho. Sin embargo, saltando con los pies juntos, sin impulso, un baloncestista entrenado se eleva más de 80 centímetros. Si tenemos en cuenta unos 40 centímetros para la flexión inicial de impulso, el centro de gravedad del jugador habrá ascendido cerca de 1,2 metros, lo que equivale a una energía de 960 julios, o de 480 julios por cuádriceps, el músculo actuante.

La diferencia hasta los 850 julios antes citados la explica la distinta naturaleza del esfuerzo del músculo, breve para el salto, más largo durante la elevación de un peso: al no haber un peso, el saltador no ejerce una fuerza máxima a lo largo de su movimiento. Por tanto, en lo que sigue, adoptaremos el valor de 500 julios por cuádriceps para estimar las prestaciones de velocistas y saltadores, y consideraremos que los atletas consumen esa energía en cada zancada de un *sprint* o de una carrera de impulso.



En halterofilia, en la arrancada, los músculos de los muslos hacen casi todo el trabajo. El atleta levanta el peso enderezándose de golpe y lo consigue comunicando al peso una velocidad suficiente (*flecha roja*) para que el mismo siga elevándose incluso mientras él se agacha para colocarse por debajo de la barra.

Unos 500 julios por zancada...

Se objetará que nuestra estimación de 500 julios corresponde a un esfuerzo único. ¿Puede un deportista desarrollar esa energía en cada impulso? La respuesta es afirmativa para los esfuerzos breves. La energía de la contracción de las fibras musculares procede de la transformación de las fibras de ATP (adenosín trifosfato) en ADP (adenosín difosfato). Nuestros músculos queman las reservas iniciales de ATP en uno o dos segundos, breve duración que alarga hasta unos diez segundos la regeneración del ADT en ATP gracias a la fosfocreatina. Ese funcionamiento del músculo, llamado anaerobio (no gasta oxígeno) y aláctico (no produce ácido láctico), suministra de 20 a 50 kilojulios, lo que asegura varias decenas de trancos.

BRUNO VACARO

El mecanismo anaerobio aláctico interviene en los levantamientos, los *sprints* y los saltos, pues permite desarrollar instantáneamente una potencia máxima. Luego, para los esfuerzos más largos, toman el relevo otros mecanismos energéticos, pues el atleta debe recurrir a las reservas de azúcar del organismo y emplear el oxígeno del aire. Durante una carrera corta, los 500 julios por zancada se convierten en energía cinética. Como se ha comprobado, la energía acumulada y la velocidad conseguida tienen unos límites. ¿Por qué? El rozamiento del aire no es la causa, ya que, para una velocidad de diez metros por segundo, la potencia muscular disipada por rozamiento es de cinco a seis veces inferior a la potencia muscular disponible. El verdadero límite procede del mismo mecanismo de la carrera: las piernas del atleta no desarrollan una velocidad constante, pues cada pie pasa alternativamente de la inmovilidad (cuando se halla en el suelo) a una velocidad doble que la del corredor.

... para alcanzar los diez metros por segundo...

El corredor renueva la energía cinética de la pierna en cada zancada. Respecto al tronco del atleta, el movimiento de la pierna, más o menos rígida, puede considerarse un movimiento de rotación alrededor de las caderas. Cuando pasa por la vertical de la pelvis, cada pierna tiene una energía cinética igual al sexto del producto de su masa por el cuadrado de la velocidad del corredor (un sexto y no la mitad, pues la velocidad de un punto de la pierna disminuye al elevarse desde el pie hasta el nivel del muslo).

Estimemos la velocidad máxima del corredor. La masa total de la pierna (con el pie) representa aproximadamente un 20 por ciento de la masa corporal. En un corredor de 80 kilogramos, eso supone 16 kilogramos. Una energía cinética de 500 julios, adquirida siempre gracias al cuádriceps, corresponde pues a una velocidad del pie de unos 13,5 metros por segundo. Es un valor muy próximo a los 12 metros por segundo que alcanzan los mejores velocistas. Aceptemos un valor de diez metros por segundo, más realista cuando tratamos con otros atletas.



En un corredor, la pierna que lo impulsa durante una zancada es la que toca el suelo. Respecto al cuerpo del atleta, el movimiento de esa pierna corresponde más o menos al de una barra rígida que gira (*flecha azul*) alrededor de la cadera. La velocidad del pie (*flecha roja*) es máxima en el instante en que la pierna pasa por la vertical de la pelvis.

Tras el *sprint*, saltemos en longitud. La energía cinética adquirida durante la carrera de impulso, 4000 julios para una velocidad de diez metros por segundo, está destinada a propulsar al atleta lo más lejos posible a lo largo de la horizontal. La balística nos dice que la máxima distancia se consigue con un ángulo de salto de 45 grados. La distancia salvada es entonces igual al cuadrado de la velocidad dividido por la aceleración de la gravedad, es decir, diez metros en nuestro caso. El récord mundial (8,95 metros) no difiere mucho.

De hecho, los saltadores se benefician del descenso del centro de gravedad entre el impulso y la caída, lo que les hace ganar longitud. La dificultad, de naturaleza morfológica, es transformar una velocidad inicial horizontal en una velocidad inclinada con respecto al suelo. Ello se traduce en una gran pérdida de energía en las articulaciones y en los músculos.

Prueba de ello la tenemos en el salto de altura, en que una velocidad de diez metros por segundo debería permitir al atleta elevarse cinco metros, en realidad unos seis metros teniendo en cuenta la elevación de su centro de gravedad. El récord actual es solo de 2,45 metros.

... y elevarse seis metros

En cambio, el de salto con pértiga es de 6,14 metros. ¿Es por azar? Pues no. La pértiga permite al atleta emplear con gran eficiencia su energía cinética inicial. En el momento en que este clava la pértiga, su impulso está casi todo dirigido hacia delante. La pértiga se comba y almacena temporalmente la energía cinética cedida por el atleta en forma de energía elástica de flexión; cuando la pértiga se distiende hacia la vertical, la energía elástica se restituye de forma progresiva, lo que permite elevarse al saltador.

En este caso, se consigue casi lo óptimo. Así, pese a las diferencias morfológicas, los plusmarquistas mundiales, Asafa Powell (100 metros), Javier Sotomayor (altura), Mike Powell (longitud), Sergei Bubka (pértiga) y Rezazadeh Hossein (halterofilia) ofrecen las mismas prestaciones: cosa del cuádriceps, les digo.

La pértiga permite al saltador transformar su energía cinética, adquirida durante la carrera de impulso, en energía elástica. Al enderezarse, la pértiga restituye esa energía cinética, que el atleta emplea para ganar altura al salvar la barra. Es un útil muy eficaz para transformar una velocidad horizontal en una velocidad vertical. El récord de altura así conseguido se acerca al valor teórico calculado según una velocidad horizontal de diez metros por segundo.

BRUNO VACARO

PARA SABER MÁS

The physics of sports. Dirigido por A. Armenti. American Institute of Physics, 1992.

Idées de physique. Blog de los autores, **http://blog.idphys.fr**

por Agustín Rayo

Agustín Rayo es investigador en el departamento de filosofía del Instituto de Tecnología de Massachusetts.



Teletransportes y trasplantes

El problema de la identidad personal

Todo el mundo sabe que el paradero turístico del momento es Marte. Se come bien, los hoteles son cómodos y los baños termales, legendarios. El problema radica en el traslado: por muy lujosa que sea la línea espacial que uno contrate, hay que pasar cuatro meses en una cabina estrecha, comiendo mal y duchándose poco. Por eso a usted le llama tanto la atención un pequeño anuncio en el diario de hoy: «¡Basta de comida deshidratada! Viaje a Marte por teletransportador». Como contacto figura un tal Dr. Mendoza. Tras titubear un poco, se decide finalmente por ir a visitarlo.

«¡Bienvenido a mi laboratorio!», exclama el pequeño hombre de bata blanca que abre la puerta. «No se preocupe, de aquí no sale nadie decepcionado.» El laboratorio se encuentra casi vacío. Aparte de una serie de ordenadores viejos, lo único que salta a la vista son dos aparatos con aspecto de frigorífico, colocados a tres o cuatro metros de distancia uno del otro. «Permítame hacer una demostración», continúa el Dr. Mendoza mientras levanta del suelo a un gatito gris que paseaba por el laboratorio y lo introduce en uno de los aparatos.

Después de que el Dr. Mendoza presione dos o tres botones en uno de los ordenadores, el ingenio en el que había introducido al gato comienza a hacer ruido. Unos minutos más tarde, zumba el segundo aparato y, finalmente, todo queda en silencio. «¡Listo!», anuncia sonriente el Dr. Mendoza. Las puertas de las cápsulas se abren y de la segunda sale maullando un gatito gris, idéntico al que antes el doctor había introducido en el aparato vecino, que ahora se encuentra vacío. «¡El teletransporte ya no es cosa del futuro!» exclama el Dr. Mendoza. «¡Y ofrezco descuentos! Trescientos euros por teletransportarlo a Marte, quinientos por un viaje de ida y vuelta, y los niños viajan a mitad de precio.»

A decir verdad, la propuesta resulta tentadora. No solo se ahorraría usted cuatro meses de incomodidades en una nave espacial, sino que el precio es muchísimo más bajo. «Tal vez *demasiado* barato...», piensa usted. «Disculpe la molestia, doctor, pero ¿podría explicarme cómo funciona su invención?»

«¡Es sencillísimo! Cuando el viajero ingresa en el primer aparato —el transmisor— se realiza un análisis detallado de su estructura molecular. Esa información se transmite al segundo dispositivo —el receptor— y allí se efectúa una reconstrucción del viajero, molécula por molécula.» «¿Y las moléculas que se encuentran en el transmisor?», pregunta usted. «Las desintegramos», responde el Dr. Mendoza.

¿Entraría usted en el teletransportador? Antes de precipitarse y aceptar, imagine la situación siguiente. Se encuentra usted dentro del transmisor, listo para su viaje a Marte. El Dr. Mendoza anuncia el inicio del proceso y comienzan a escucharse los zumbidos habituales. Usted cierra los ojos unos minutos y, al abrirlos, comprueba que se encuentra en el interior de un aparato. La puerta se abre lentamente. Usted saca la cámara fotográfica del bolsillo, pues no desea perderse ni un solo paisaje marciano. Sin embargo, al salir de la cápsula descubre con gran desilusión que, en lugar de en mitad de un paisaje marciano, se halla en el laboratorio del Dr. Mendoza. «No parece haber funcionado...», objeta. «No, no. Todo ha salido bien», responde el Dr. Mendoza. «La transmisión fue un éxito y usted ha quedado ya reconstruido en Marte. Pero hemos experimentado problemas con el sistema que se encarga de desintegrar la materia en el transmisor. Tenga la gentileza de volver a ingresar en el aparato para que lo desintegremos manualmente.»

Resulta evidente que nos encontramos ante un problema. Aun si aceptamos que la persona que sale del receptor en Marte es una copia exacta de quien entró en el transmisor, no resulta obvio que se trate de la *misma* persona. El ejemplo del desintegrador defectuoso sugiere que lo que ha inventado el Dr. Mendoza no es un teletransportador: lo que hace el aparato es destruir al «viajero» y luego construir una copia suya.

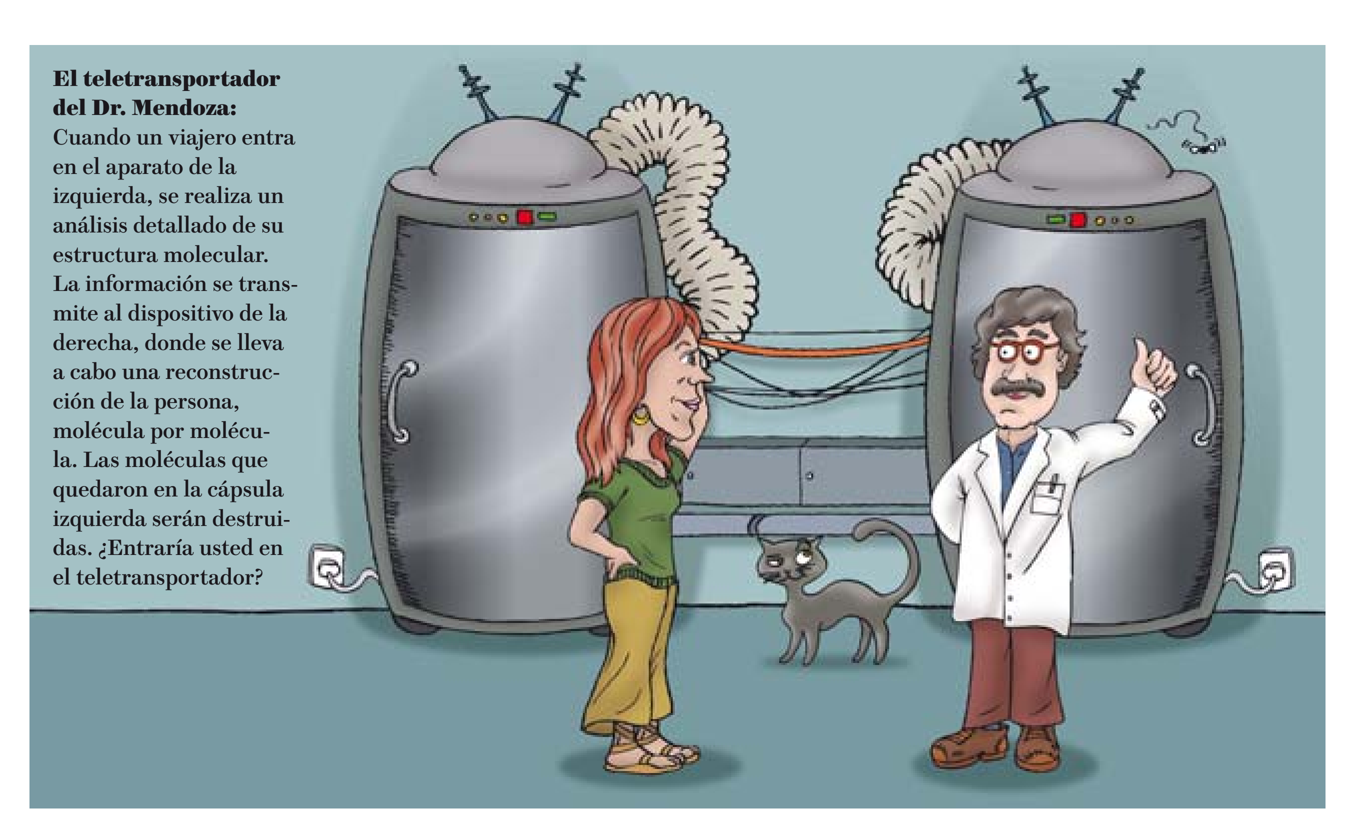
Si la persona que emerge del receptor en Marte es una copia perfecta de quien ingresó en el transmisor, existirá una continuidad psicológica entre ambas: si el sujeto entró en el transmisor con hambre, la persona en Marte saldrá hambrienta; si quien se introdujo en el transmisor sabía mecánica automotriz, la persona que se materialice en Marte dispondrá también de esos conocimientos. Pero la lección que hemos de extraer es que la continuidad psicológica no basta para que la persona del laboratorio sea la misma que la que se encuentra en Marte. ¿Será que la identidad de un sujeto reside en las moléculas que lo componen?

Doctores perversos

Imagínese ahora en la siguiente situación: «Malas noticias», anuncia su médico. «Tiene usted una enfermedad cerebral incurable. Sus neuronas morirán, una a una, en el transcurso de dos o tres años. Por fortuna, contamos con los medios adecuados para realizar trasplantes neuronales. Cada vez que muera una de sus neuronas, la reemplazaremos con una de silicona. No se preocupe: usted no notará absolutamente nada. Al cabo de algún tiempo, todas sus neuronas habrán sido sustituidas y podrá continuar con su vida normal.»

¿Estaría usted dispuesto a someterse al tratamiento? También esta propuesta parece difícil de rechazar, pues resulta tentador pensar que *sobreviviremos* al tratamiento: que la persona que inicia la cura y la persona que la termina son *la misma*.

Seamos claros: lo que le ofrece el médico es un trasplante de cerebro realiza-



El teletransportador del Dr. Mendoza: Cuando un viajero entra en el aparato de la izquierda, se realiza un análisis detallado de su estructura molecular. La información se transmite al dispositivo de la derecha, donde se lleva a cabo una reconstrucción de la persona, molécula por molécula. Las moléculas que quedaron en la cápsula izquierda serán destruidas. ¿Entraría usted en el teletransportador?

do de manera gradual. El nuevo cerebro se compondrá enteramente de silicona, de modo que, si piensa que sobreviviría al tratamiento, será porque cree que su identidad puede ser transferida a un órgano de silicona. Pero si su identidad no depende de la materia física de la que se halla compuesto, ¿por qué habría de temer el teletransporte? Al igual que su médico, el Dr. Mendoza intenta transferir sus estados mentales a un nuevo conjunto de moléculas. ¿Por qué debería importar si esas moléculas se encuentran aquí o en Marte?

Resulta fácil imaginar casos aún más extraños. Supongamos que su médico le ha engañado. Su cerebro se encuentra en perfecto estado y lo que el doctor desea es robárselo. Como antes, reemplaza sus neuronas por otras de silicona. Pero, en lugar de desechar las neuronas originales, las utiliza para reconstruir su cerebro en una habitación vecina. El cerebro reconstruido es idéntico al original, y el médico lo implanta en otro cuerpo. Al final hay dos personas: por un lado, su cuerpo original con el cerebro de silicona; por otro, el cuerpo nuevo con el cerebro original. ¿Quién de los dos es usted?

En el mundo real existen personas que llevan una vida normal con solo uno de sus hemisferios cerebrales. Imaginemos que su médico —un hombre perverso— divide su cerebro en dos e implanta cada hemisferio en un cuerpo diferente. De nuevo existen ahora dos personas distintas, cada una de ellas con una vida mental parecida a la suya. ¿Quién de las dos es usted? ¿Ninguna? ¿Ambas?

Personalidades momentáneas

En mi opinión, supone un error buscar respuestas objetivas a preguntas como las anteriores. Deberíamos pensar en las personas como en seres de existencia momentánea. En lugar de pensar en un único Cervantes que existió entre 1547 y 1616, podemos considerar una larga secuencia de Cervantes momentáneos: el Cervantes que nacía, el que quedaba herido en la batalla de Lepanto, el que escribía la primera frase de *El Quijote* y muchísimos Cervantes más.

En situaciones comunes y corrientes, como la de los muchos Cervantes, resulta natural asociar una secuencia de personas momentáneas a un único individuo. Pero en casos más complicados, como los que hemos expuesto aquí, no es fácil saber qué secuencia de personas momentáneas ha de considerarse como un solo individuo. ¿La que comienza con su nacimiento y termina en el laboratorio del Dr. Mendoza, o la que continúa en las termas de Marte? ¿La que comienza con un cerebro orgánico y acaba con uno de silicona, o la que termina con el cerebro orgánico en otro cuerpo?

El resultado de todo esto es que carece de sentido preguntar quién es realmente usted: el sujeto en Marte o en el laboratorio, la persona con el cerebro de silicona o aquella en la que se implantó el cerebro original. Lo que sí tiene sentido es que la persona momentánea que es usted ahora se pregunte a cuál de las dos personas momentáneas futuras valora más. Y la respuesta depende de usted, no de un hecho objetivo en el mundo.

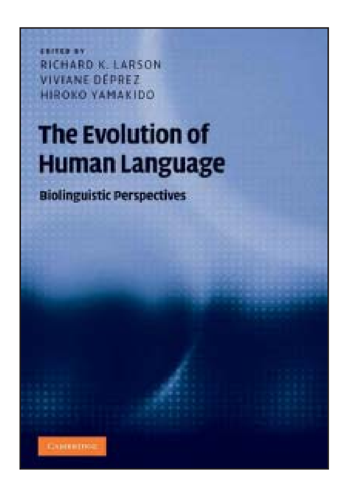
Pero la falta de una respuesta objetiva no resta importancia a la pregunta de a qué personas futuras valorar, ya que las decisiones que tome la persona momentánea que es usted hoy afectarán a personas momentáneas futuras. Si se va de juerga hoy por la noche y gasta todo su dinero, la persona momentánea que amanecerá mañana sobre su almohada se sentirá intranquila. ¿Qué valora usted más? ¿La diversión de la persona momentánea que se encuentra de fiesta o la tranquilidad de la persona momentánea que amanecerá mañana? Los casos que hemos analizado aquí demuestran que no siempre resulta fácil decidir a qué personas futuras valorar.

PARA SABER MÁS

Dos textos clásicos sobre el tema:

The self and the future. Bernard Williams en *Philosophical Review*, vol. 79, 1970.

Reasons and persons. Derek Parfit. Oxford University Press, 1986.



THE EVOLUTION OF HUMAN LANGUAGE. BIOLINGUISTIC PERSPECTIVES.

Edición preparada por Richard K. Larson, Viviane Déprez y Hiroko Yamakido. Cambrige University Press; Cambridge, 2010.

Biolingüística

¿Qué es, quién la posee y cómo se adquirió, en el curso de la evolución, la facultad del lenguaje?

Los lingüistas distinguen entre habla (producción física de las expresiones) y lenguaje (gramática y significado de tales expresiones). En la quinta parte del *Discours de la méthode*, René Descartes sostiene que lo que distingue al ser humano del resto del mundo animal es su capacidad para construir enunciados nuevos. Un papagayo puede hablar, pero no posee un lenguaje; se limita a repetir frases allí donde el hombre crea, casi hasta el infinito, nuevos enunciados. Eso demuestra, para Descartes, que el ser humano posee razón, a diferencia del papagayo. Noam Chomsky construyó su teoría de la gramática universal sobre el filósofo Descartes.

En *Syntactic structures*, publicado en 1957, Chomsky reservaba la facultad del lenguaje al cerebro humano. La sintaxis situaba al lenguaje humano fuera del resto de los sistemas de comunicación naturales. Unos treinta años después, en *Knowledge of language: Its nature, origin, and use* (1986), Chomsky defendía que la base neural del lenguaje humano era un «módulo», único y distinto de los mecanismos que regulaban otros aspectos del comportamiento humano o animal. Las teorías modulares sostienen que la arquitectura funcional del cerebro humano es similar a la del computador digital, en el que un conjunto discreto de dispositivos controla la pantalla, otro el teclado, etcétera. Bajo una sintaxis compleja subyace la recursión. Se dominó en un momento en que los humanos tenían ya un lenguaje cuyos rasgos básicos no divergían de los modernos lenguajes de signos. Luego, en otro avance evolutivo, la vocalización empezó a superar a la gesticulación. Lo que trajo consigo una segunda liberación de las manos para otras actividades. La tendencia consumó su trayectoria con la llegada del hombre moderno, esto es, con la ola final de emigraciones de África, hace unos 50.000 años.

La forma en que el lenguaje ha evolucionado como facultad genuinamente humana es una cuestión que ocupa a investigadores de diversas disciplinas. En *The evolution of human language*, se aportan distintos enfoques convergentes en el origen del lenguaje, su genética, antropología, estructura formal y relación con los sistemas de cognición. De una manera más ceñida, se trata de una reflexión sobre lo avanzado desde la aparición en 2002 de un ensayo seminal publicado en *Science*, por Marc Hauser, Chomsky y W. Tecumseh Fitch, con el título «The faculty of language. What is it, who has it, and how did it evolve?». En el artículo, se establecía una separación nítida entre facultad del lenguaje en sentido restricto (FLR) y facultad de lenguaje en sentido amplio (FLA). La primera constituiría un sistema lingüístico y abstracto de computación, independiente de los otros sistemas con los que interaccionaba y formaba interfaces. La facultad del lenguaje en sentido amplio incluía los otros sistemas cognitivos que resultaban cruciales para el lenguaje, aunque pudiesen también desempeñar funciones de índole diversa. El mecanismo neural hipotético que hace posible un lenguaje pertrechado de una sintaxis es una facultad del lenguaje restringida, que nos permite expresar sentencias novedosas. La FLR es un componente de la FLA; los mecanismos subyacentes a la FLR forman un subconjunto de los mecanismos subyacentes a la FLA.

Fitch acaba de publicar, por su parte, *The Evolution of language*, en la misma editorial Cambridge. Aporta una visión magistral de conceptos y datos de biología evolutiva que nos permiten estudiar la evolución de la anatomía vocal y sus bases nerviosas. Pone cierta sordina a las posibles conclusiones que podamos extraer de la anatomía de cadáveres animales. La investigación comparada sobre la anatomía del tracto vocal de los mamíferos había considerado la disposición humana en doble tubo (resultado de una laringe en permanente descenso) exclusiva de nuestra especie. Se sabía mucho de la estructura anatómica del tracto vocal en otros mamíferos, pero nadie lo había abordado en funcionamiento. Cuando Fitch, biólogo cognitivo de la Universidad de Viena, tomó registros de vídeo, en rayos X, de cabras, perros y ciervos, observó que los animales creaban dinámicamente la cavidad vocal de dos tubos en el descenso transitorio por la laringe. Pero solo mientras estaban vocalizando. El fenómeno desaparecía cuando el animal se hallaba en reposo, muerto o fósil.

Al abordar los orígenes del lenguaje natural y sus componentes, afloran espontáneas tres cuestiones nucleares. Una primera es la distinción entre lo compartido y lo único. ¿Se trata de una propiedad exclusiva del hombre o la poseen también otras especies? Aunque las abejas danzan, las aves cantan y los chimpancés gruñen, sus sistemas de comunicación difieren cualitativamente del lenguaje humano. En particular, los sistemas de comunicación animal carecen de la fuerza expresiva y abierta a la creación del lenguaje humano (basado en la capacidad de recursión). Una segunda cuestión gira en torno a la evolución del lenguaje, si fue gradual o saltacionista. Por fin, la cuestión de la continuidad o exapción gira en torno al problema de si el lenguaje humano evolucionó mediante la extensión gradual de sistemas de comunicación preexistentes o si hubo importantes aspectos del lenguaje que fueron objeto de cooptación a partir de funciones adaptativas anteriores (razonamiento espacial o numérico, maquiavelismo social, creación de herramientas).

Pese a la controversia en que se han enredado las posiciones en torno a tales cuestiones, existe un punto de convergencia común: aunque los humanos y los animales comparten numerosos recursos computacionales y perceptivos, se ha producido una remodelización evolutiva sustancial desde el momento en que iniciamos nuestra singladura específica, hace unos seis millones de años. Pero no resulta fácil determinar qué es lo que se heredó sin cambio del último antepasado

común, qué es lo que sufrió leves modificaciones y qué es lo innovadoramente nuevo.

Tres son también las hipótesis principales a las que se reducen las concepciones sobre el lenguaje y su origen. De acuerdo con la primera, la *FLA sería estrictamente homóloga a la comunicación animal*. Admite, pues, capacidades homólogas (menos desarrolladas, cierto) de la FLA, FLR incluida, en animales no humanos; observaríamos unos componentes funcionales asimilables. Para la segunda hipótesis, la *FLA sería una adaptación derivada y exclusivamente humana del lenguaje*. Lo sería en el mismo sentido que el ojo de los vertebrados. Muchos de sus componentes nucleares deberían considerarse trazos individuales que han sido sometidos a selección y perfeccionados en la reciente historia evolutiva. La selección natural habría desempeñado un papel crucial en la conformación de muchos aspectos de la FLA, incluida la FLR; además, carecerían de equivalente en animales no humanos. Aunque hubiera mecanismos homólogos en otros animales, las versiones humanas han sido modificadas por selección natural hasta el punto de que pueden ser razonablemente consideradas rasgos novedosos o exaptados.

De acuerdo con la hipótesis tercera, solo la *FLR sería exclusivamente humana*. En cambio, la FLA se basaría en mecanismos compartidos con animales no humanos. La facultad del lenguaje restringida designa, en este marco teórico, un mecanismo computacional de recursión, adquirido como propiedad exclusiva del hombre en el curso de la evolución. En el núcleo de la FLR encontramos un sistema computacional (sintaxis) que genera representaciones internas y la cartografía en la interfaz sensorio-motora mediante el sistema fonológico; hace lo propio dentro del sistema conceptual-intencional mediante el sistema semántico (formal). Una propiedad clave de la FLR es la recursión: toma un conjunto finito de elementos y crea una disposición potencialmente infinita de expresiones discretas.

—Luis Alonso



EL DISEÑO CHAPUCERO. DARWIN, LA BIOLOGÍA Y DIOS,

por Leandro Sequeiros.
Ediciones Khaf;
Madrid, 2009.

Ciencia y religión

Diálogo abierto

Desde su publicación en 1859, la obra de Darwin, en la que establece los mecanismos de la evolución biológica, ha causado un continuo debate con el pensamiento religioso, en especial, el cristiano. Leandro Sequeiros, que ha publicado ya numerosos artículos y libros sobre el tema, se adentra de nuevo en él con su habitual habilidad de juntar el rigor científico y la presentación amena, de forma que su lectura se hace fácil y agradable. A pesar de su corta extensión, el libro tiene una considerable densidad de información, no solo sobre el problema de la evolución, sino de la relación general entre ciencia y religión.

Como el tema suscita siempre posiciones encontradas, el autor lo primero que hace es clarificar las diversas posturas existentes. A lo largo de los ocho capítulos del libro va desarrollando su pensamiento, en el que trata de analizar las relaciones entre la teoría de la evolución biológica y el pensamiento religioso. Su reflexión se abre con un breve panorama histórico del nacimiento con Darwin de la teoría de la evolución biológica y las respuestas que surgieron frente a ella en el campo religioso, desde su rechazo inicial por posturas más conservadoras a su aceptación paulatina, ya en tiempos mismos de Darwin. De esta forma va tratando las nuevas propuestas del diseño inteligente, el ateísmo militante de Dawkins y Denté, que convierten el evolucionismo en la única respuesta a las preguntas que plantea la realidad, y la postura creyente de Collins, que habla de una evidencia científica de la fe.

Un capítulo en el que resume un debate entre Dawkins y Collins sirve al autor para clarificar y dar su interpretación sobre las posturas de ambos. Dedica otra interesante sección al nuevo punto de vista de la evolución que ofrece el modelo evolución-desarrollo, o modelo Evo-Devo, y al problema de la emergencia de novedad a lo largo del proceso evolutivo. Aquí se pasa del análisis puramente científico, que tiende a caer en el reduccionismo, a consideraciones holísticas sobre las realidades complejas del mundo biológico, que abren el camino a la reflexión filosófica y aun a la teológica. Aunque el autor no lo menciona, se deja de ver aquí la existencia de la frontera borrosa entre los planteamientos estrictamente científicos y la inevitable reflexión filosófica que difícilmente se puede evitar. A veces, los científicos caen en la tentación de traspasar esa frontera y al mismo tiempo querer dar a sus reflexiones filosóficas el mismo valor que a sus conclusiones científicas.

En el último capítulo, titulado «El necesario encuentro entre Darwin, la biología y Dios», el autor entra de lleno primero en la reflexión filosófica sobre la biología, lo que él llama la «biofilosofía», para desde ella buscar una respuesta a la pregunta de qué es el hombre, fruto de la evolución biológica, el único ser que puede reflexionar y comprender el mundo en que se encuentra, para desde ella abrirse a la pregunta sobre la autosuficiencia del universo y la necesidad de un creador. Podemos decir que se pasa de la consideración del enigma del hombre a la del misterio de Dios.

Concluye el autor proponiendo un diálogo abierto entre el mundo de las ciencias y el de las religiones, un diálogo sin duda enriquecedor y constructivo. A lo largo del libro se dan numerosas citas de libros y artículos, así como direcciones en la Red donde se puede encontrar más información sobre el tema de las relaciones sobre ciencia y religión, y en especial con referencia al campo de la biología.

—Agustín Udías Vallina

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

Abril 1961

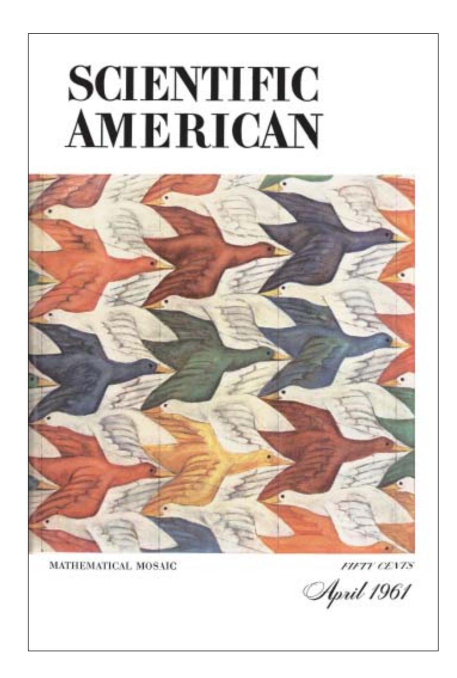
Azulejos

«El artista holandés Maurits C. Escher, actualmente residente en Baarn, cerca de Ámsterdam, ha elegido algunos de los 17 grupos de simetría para aplicarlos a mosaicos en los que se emplean formas animales en las regiones fundamentales. En la cubierta de *Scientific American* se reproduce uno de los más sorprendentes mosaicos de Escher. Es un pintor que disfruta jugando con las estructuras matemáticas. Hay una respetable escuela estética que ve todo el arte como un juego y una escuela matemática, igualmente respetable, que contempla todos los sistemas matemáticos como juegos sin sentido practicados según unas reglas convenidas.»

Economía y desarme

El gobierno de EE.UU. ha venido gastando algo más de 40.000 millones de dólares al año en la organización militar y la compra de armas. Esos desembolsos han absorbido alrededor del 10 por ciento del producto nacional bruto y han superado en varios miles de millones de dólares la inversión anual neta conjunta en manufactura, industria de servicios, transporte y agricultura. Las negociaciones de desarme podrían plantear la posibilidad de recortar considerablemente el presupuesto militar. Por ello, economistas, analistas de mercados y responsables de la política fiscal oficial y de las finanzas han empezado a considerar el futuro destino, de cambiar las circunstancias, de la mano de obra, instalaciones y recursos materiales que ahora abastecen —directa e indirectamente— a la organización militar. —Wassily W. Leontief y Marvin Hoffenberg»

Leontief recibió el premio Nobel de Economía en 1973.



M. C. Escher: **ciencia de la simetría y matemática de la estética, 1961.**



Abril 1911

La carrera al Polo Sur

«Noticias del capitán Scott informan de que Amundsen, como él mismo, está tratando de llegar al Polo Sur. El barco de Scott, el *Terra Nova*, ha regresado a Nueva Zelanda tras desembarcar en el hielo equipos de exploración con trineos y ha traído noticias directas del capitán Scott. Parece que el teniente Pennel, miembro de la expedición, identificó el *Fram*, el barco de Amundsen, en la bahía de Islandia con un equipo noruego totalmente preparado para un viaje al Polo Sur. A bordo del *Fram* se hallaban ocho hombres y dieciséis perros groenlandeses. Nada se sabía de la expedición de Amundsen hasta las noticias traídas por Scott.»

La hora de Greenwich

«El 10 de febrero de 1911 el senado francés aprobó un proyecto de ley para implantar en Francia la hora de Greenwich. Cuando la ley entre en vigor, la hora francesa se retrasará nueve minutos y veintiún segundos con respecto a la actual. Al objeto de evitar los gastos de cambiar las cartas y las reglas de navegación, la ley no se aplicará a la armada ni a la marina mercante; asimismo, no es probable que se haga cambio alguno en los almanaques. Los ferrocarriles franceses se rigen ahora por un patrón cinco minutos más lento que la hora de París, patrón que regula los relojes en el interior de las estaciones, mientras que en el exterior los relojes indican la hora de París correcta. Este lioso sistema será abolido y todos los relojes, exteriores e interiores, estarán reglados por la hora de Greenwich, con la que se aperarán los trenes.»



Abril 1861

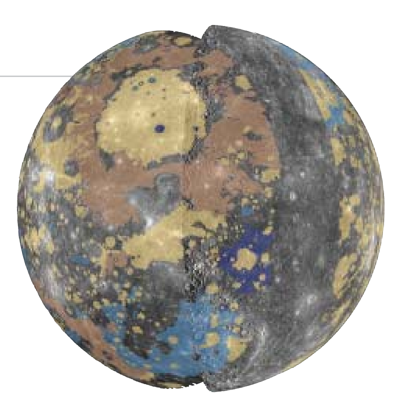
Cesio

«El primer resultado del nuevo método analítico basado en las líneas espectrales fue la identificación de los compuestos presentes en el Sol. El resultado siguiente: el descubrimiento de dos nuevos metales en nuestro planeta. Uno de ellos ha recibido el nombre de cesio, por el color que presentan las peculiares líneas de su espectro luminoso. Cesio procede del latín caesium, “azul”. Al otro elemento aún no se le ha dado nombre [posteriormente se le llamó rubidio]. Por sus propiedades, el cesio se asemeja al potasio y existe en cantidades sumamente pequeñas.»

Relojeros

«Frederika Bremer ofrece la siguiente imagen de la industria relojera ginebrina: “La manufactura de relojes de bolsillo se realiza en una gran parte de Ginebra. El mercado chino los demanda en cantidades inmensas. Todo chino bien provisto, me han contado, lleva un reloj en cada costado del pecho, y tal vez ponga en hora cada uno de ellos sirviéndose del otro. Los chinos acomodados cubren de relojes las paredes de sus habitaciones. Esos relojes son de un estilo más ornamental y llevan más filigranas que los fabricados para los europeos. ¡Larga vida a los chinos! En una de las fábricas de mayor tamaño y mejor dirigidas de Ginebra solo se preparan esferas de reloj, actividad en la que ocupan unas señoras de edad, bien vestidas y de aspecto agradable, que se sientan, en grupos de veinte y treinta, en habitaciones limpias y bien caldeadas”.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 204, N.º 4; ABRIL DE 1961

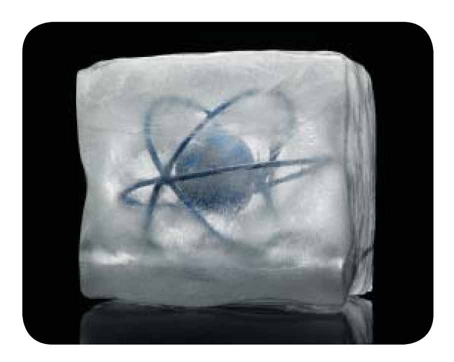


ESPACIO

Viaje al planeta más cercano al Sol

Scott L. Murchie, Ronald J. Vervack, Jr. y Brian J. Anderson

Nunca antes una sonda espacial había orbitado alrededor de Mercurio. El pasado mes de marzo se consiguió.



FÍSICA

La búsqueda del cero absoluto

Mark G. Raizen

Un experimento imaginario del siglo XIX se ha convertido en un procedimiento factible para alcanzar temperaturas extremadamente bajas. Ello abre el camino a nuevos hallazgos y aplicaciones de gran utilidad.

MEDICINA

Enfermedades en una placa de Petri

Stephen S. Hall

Las células madre procedentes de tejidos adultos podrían impulsar el desarrollo de fármacos para combatir enfermedades debilitantes.

PALEONTOLOGÍA

Trampa mortal

Paul C. Sereno

Los fósiles hallados en una fosa del desierto de Gobi arrojan luz sobre la vida de los dinosaurios.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Cardona: *La revolución azul*; M.ª José Báguena: *Combatir la obesidad*; Francesc Castelló: *Las dos caras del tiempo*; Luis Bou: *Lenguaje y pensamiento* y *Una mente extracorpórea*; Joandomènec Ros: *Amigo de las invasoras* y *Mares silenciosos*; Raquel Santamarta: *Viaje a la escala electrodébil*; Juan Manuel González Mañas: *La vida interior del genoma*; Bruno Moreno: *Apuntes*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física* y *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España